

Institut für Atmosphäre und Umwelt Goethe-Universität Frankfurt

**Verkehr, CO₂-Ausstoß und Treibhauseffekt;
globale Entwicklung bis zum Jahr 2030.**

Ein kritischer Vergleich der existierenden Studien.

Langtitel: Verkehr, CO₂-Ausstoß und Treibhauseffekt, globale
Entwicklung bis zum Jahr 2030 – Fokus Europa, Vereinigte
Staaten von Amerika und Länder des Asiatisch-Pazifischen
Raums. Ein Vergleich der existierenden Studien. Modellbildung
von Wachstum und Prognose der CO₂-Emissionen, mit
unterschiedlichen Annahmen der Struktur des Verkehrs und der
Antriebssysteme

Masterarbeit

eingereicht von

Felix Bremicker

Matrikel-Nr.: 3681099

Betreuer: Prof. Dr. Gundolf Kohlmaier

Abgabe: 06.12.2010

Vorwort

Nach der missglückten Weltklimakonferenz in Kopenhagen im Dezember letzten Jahres (2009), auf der ein Anschlussprotokoll (ab Januar 2013) an das Kyoto-Protokoll vereinbart werden sollte, sind um so mehr Anstrengungen jedes einzelnen Landes, ja jedes einzelnen Bürgers nötig, um das künftige Klima zu stabilisieren. Dabei muss eine besondere Anstrengung der Reduktion des CO₂-Ausstoßes gelten, womit sich auch vorliegende Arbeit beschäftigt. Der besondere Fokus hierbei liegt auf dem Verkehrssektor, der sich vom Jahr 2010 mit etwa einer Milliarde Fahrzeugen weltweit – d.h. PKW und Nutzfahrzeuge zusammen – bis zum Jahr 2030 verdoppeln soll (Dargay et al (2007)). Die vorliegende Arbeit soll die Ergebnisse der vorhandenen Studien wiedergeben und diese kritisch beleuchten und schließlich eigene Ansätze zu Verkehr und CO₂-Entwicklung in der Zukunft vermitteln. Der Verkehr Deutschlands trägt mit 28,2% der Endenergie (9.126 Petajoule in 2008 siehe Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen), und einem Anteil des Straßenverkehrs von 23% ganz wesentlich zum Energie- und CO₂-Budget von 833 Mt CO₂ (2008) bei, an dem der Verkehr mit 18,1% beteiligt ist. Global berechnet die Internationale Energieagentur IEA für 2006 einen fast gleichwertig Anteil des Verkehrs von 27,5% an der Endenergie von 339.000 Petajoule (2006), und einen höheren Verkehrsanteil der CO₂-Emission von 22,4% an einer Gesamtemission von 27.889 Mt. CO₂ (2006). Studien der OPEC (Organisation of Petroleum Exporting Countries) mit ihrem *World Oil Outlook WOO*, der Internationalen Energieagentur IEA mit ihrem *World Energy Outlook* und des Internationalen Währungsfonds (International Monetary Fund) IMF mit ihrem *World Economic Outlook WEO* prognostizieren einen steigenden Anteil der Verkehrsbelastung bis zum Jahr 2030, und darüber hinaus auch an Energienachfrage, sowie an CO₂-Emissionen. Dargay et al (2007) berechnen explizit die Fahrzeugentwicklung für 45 ausgewählte Länder und prognostizieren einen globalen Anstieg im Straßenverkehr von 800 Millionen Fahrzeugen im Jahr 2000 bis 2.100 Millionen Fahrzeugen im Jahre 2030. Lassen sich solche Entwicklungen, bedingt durch das rasante Wachstum der BRIC-Länder Brasilien, Russland, Indien und China, noch mit der 2°C Leitplanke der Temperaturerhöhung vereinbaren, die langfristig bis zum Ende

des Jahrhunderts eine Erhöhung der Treibhausgase (THG) auf 450 ppmV CO₂-Äquivalent stabilisieren will, obwohl diese atmosphärischen Konzentrationen heute teilweise schon erreicht bzw. überschritten sind?

Hier soll zunächst einmal die Situation des Einzelnen dargestellt werden, die vom UBA, dem Umweltbundesamt unter dem Titel: „Die CO₂-Bilanz des Bürgers“ ausführlich diskutiert wird. Mithilfe der im Internet verfügbaren CO₂-Rechnern der BLU, der Bayrische Landesanstalt für Umwelt, dem UBA-Umweltbundesamt, der von Greenpeace oder von WWF– lässt sich der persönliche Klimafußabdruck bestimmen. Dabei liegt der gesamtdeutsche Durchschnitt an THG bei 959 MtCO₂-eq bzw. 833 Mt CO₂ in 2008 und bei 878 Mt CO₂-eq und 765 Mt CO₂ im Jahre 2009, da hier der CO₂-Ausstoß aufgrund der Wirtschaftskrise und der damit einhergehenden Stagnation der Wirtschaft reduziert war. Dividiert durch 82,5 Millionen Einwohner ergibt dies einen Durchschnitt von 11 t CO₂-eq pro Kopf. Im Vergleich emittiert ein durchschnittlicher Amerikaner über 19 Tonnen, ein Inder hingegen nur 1,1 Tonnen. Wie weit diese Spannweite ist, zeigt Tabelle 1, wobei alle Altersgruppen hier gleichwertig eingehen. Daher sind die aufgelisteten Ergebnisse nur als Orientierungshilfe zu betrachten (Rechner siehe auch Anhang Tabelle 1).

Tabelle 1: verschiedene CO₂-Rechner aus dem Internet im Überblick

http://uba.klima-aktiv.de/umleitung_uba.html

Pro Kopf CO₂- Emissionen in Tonnen	Student	Umwelt- bewusster Zweipersonen haushalt	Berufs- pendler Auto	Vielflieger USA	Vielflieger Deutschland	Durch- schnitt
Konsum	1,76	1,89	2,95	5,15	3,83	3,07
Ernährung	2,0	1,8	1,89	2,66	1,79	1,55
Flugverkehr	0,78	0	1,21	56,04	7,73	0,85
Öffentl. Verkehr	0,79	1,19	0,08	0,8	0,89	0,11
Privat-	0	0	2,46	4,59	1,11	1,56

fahrzeuge						
Strom	0,41	0,02	0,43	0,99	0,04	0,75
Heizung	0,4	0,09	1,2	2,32	0,23	2,0
Öffentliche Emissionen	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
Summe	7,26	6,1	11,32	73,66	16,73	11

In der oben stehenden Tabelle wird explizit auf den Haushaltskonsum an Waren, auf die Ernährung, auf den Verkehr, auf Strom und Heizung für den Haushalt und auf Emissionen des öffentlichen Sektors hingewiesen. Zentral für diese Arbeit ist der Verkehr, wobei dem Personenkraftverkehr eine ganz wichtige Rolle zukommt. Für den Flugverkehr sind die genannten Werte immer noch mit einer Unsicherheit verknüpft, weil neben CO₂ auch noch andere Emissionen berücksichtigt werden müssen, wie z.B. Wasserdampf, die zu den bekannten Kondensstreifen in der höheren Atmosphäre und einem zusätzlichen Treibhauseffekt führen.

Bezüglich des Lebensmittelkonsums lässt sich berichten, dass in Deutschland jeder Erwachsene durchschnittlich 2.600 kcal durch die Nahrung aufnimmt, was 10.900 kJ/Tag entspricht. Die Umrechnung über Joule in kWh ($3.600 \text{ J} = 1 \text{ kWh}$) ergibt dann eine tägliche Energieaufnahme von 3 kWh täglich oder 125Wh/h. Ließen wir entsprechend eine hypothetische 125W-Glühlampe, oder besser eine 60 Watt, eine 40 Watt und eine 25 Watt Lampe einen Tag lang brennen, so würde dies der Energieaufnahme des Erwachsenen entsprechen.

Entsprechende Umrechnungen ergeben, dass jeder Deutsche 1,1 Kilogramm CO₂ pro Tag durch die Nahrungsaufnahme emittiert. Der Jahresdurchschnitt liegt demnach bei 400 Kilogramm CO₂ pro Kopf.

Beim Konsum ist ferner zu beachten, dass Produktion, Transport und Verwertung in die Bilanz einfließen. Daher müssen beim Kauf importierter Handelsgüter aus anderen Kontinenten beispielsweise der hohe CO₂-Ausstoß beachtet werden, den weite Transportwege unweigerlich mit sich führen, oder auch mögliche umweltschädliche Produktionsweisen in anderen Ländern ernst genommen werden. Daher empfiehlt sich oftmals der Erwerb nationaler Produkte, um die Umwelt nicht zusätzlich zu belasten.

In dieser Arbeit sind mehrere Querverweise zu einem Anhang zu finden. Aufgrund der Größe des Anhangs wurde dieser auf eine CD gebrannt, die im Seiteneinband zu finden ist. Der Anhang ist folgendermaßen aufgebaut:

- AMV steht für Anhang Modellierung Verkehr
- AMK für Anhang Modellierung Klima und
- AL bedeutet Literatur.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
Glossar	XIII
1 Einleitung	14
2 Grundlagen	17
2.1 Kohlendioxid.....	17
2.1.1 Eigenschaften	17
2.1.2 Quellen	20
2.1.3 Budget	21
2.2 Energiebudget	24
2.2.1 Energiebudget von Deutschland	24
2.2.2 weltweites Energiebudget	27
2.3 Politische Rahmenbedingungen.....	31
2.3.1 Deutsches Erneuerbare Energien Gesetz.....	31
2.3.2 Umweltschutzprogramme der EU	31
2.3.3 Maßnahme für den Verkehr.....	32
2.4 Modellierungsgrundlagen	32
2.5 Grundlagen zur Physik der Bewegung eine Autos	34
3 Mögliche Veränderungen	35
3.1 Politik	35
3.1.1 Einführung einer Geschwindigkeitsbegrenzung.....	36
3.1.2 Einführung eines CO ₂ -Grenzwertes	36
3.2 Technische Errungenschaften	38
3.2.1 Hybridantrieb.....	38

3.2.1.1 Serieller Hybrid	40
3.2.1.2 Parallel Hybrid	41
3.2.1.3 Mild Hybrid	42
3.2.1.4 Full Hybrid	43
3.2.2 Brennstoffzelle.....	43
3.2.3 Alternative Kraftstoffe	45
3.2.3.1 Biodiesel	46
3.2.3.2 Synfuels	46
3.2.3.3 Bioethanol	48
3.2.3.4 Autogas.....	48
4 Aussagen der verschiedenen Studien mit Schwerpunkt Straßenverkehr	49
4.1 Transport, Energy and CO ₂ , International Energy Agency 2009	49
4.2 World Oil Outlook, OPEC 2009	52
4.3 Income's effect on car and vehicle ownership worldwide 1960-2030 von Dargay und Gately.....	56
4.4 GAINS Report, 2010,	59
4.5 QUANTIFY Intergrated Project 2005-2010.....	65
4.6 International Transport Forum, OECD, 2008	69
4.7 International Energy Outlook 2010, U.S Energy Information administration, US Department of Energy	71
4.8 Heidelberger Umwelt- und Prognoseinstitut, Folgen einer Massenmotorisierung,1995	73
4.9 Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Klimaschutz und PKW-Verkehr 2007 und Klimawirksame Emissionen des PKW Verkehrs, Wuppertal Spezial 2006	75
4.10 Shell PKW- Szenarien bis 2030 (2004) und Shell LKW-Studie bis 2030 (2010) ...	78
4.11 Mobilitätsentwicklung bis 2050, BMVBS, 2006.....	82
5 Modellierung und Bewertung	83
6 Elektromobilität	94
7 Weitere Transportsektoren	100

7.1 Schiffsverkehr	101
7.2 Bahnverkehr	102
7.3 Flugverkehr.....	104
8 Transport der Zukunft	109
9 Zusammenfassung.....	112
Literaturverzeichnis mit Internetzitenen	119
Anhang	124
Danksagung	128
Eidesstattliche Versicherung	129

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mauna Loa Kurve, http://www.europa.clio-online.de/Portals/_Europa/images/default/E_Uekoetter_Geschichte_der_Umwelt_aabb.jpg.....	18
Abbildung 2: Energiehaushalt der Erde, Arbeitskreis G. Kohlmaier	19
Abbildung 3: Flüsse und Bestände beim ungestörten und durch den Menschen gestörten globalen Kohlenstoffkreislauf.....	22
Abbildung 4: Energieflussbild Deutschland 2008 (AG Energiebilanzen 2009 in Energie für Deutschland BMWT 2009, Seite 18)	25
Abbildung 5: Vergleich zwischen Referenz und 450 ppm Szenario, IEA.....	28
Abbildung 6: IEA Investitionen in verschiedenen Energiesektoren, IEA	29
Abbildung 7: CO₂-Intensität im 450 ppm Szenario.....	30
Abbildung 8: Aufbau eines seriellen Hybridantriebes.....	40
Abbildung 9: Aufbau eines Parallel Hybridantriebes	42
Abbildung 10: Wirkungsweise Brennstoffzelle	44
Abbildung 11: GAINS-Ergebnisse für China, Indien und Deutschland, GAINS Report 2010, http://gains.iiasa.ac.at/index.php/home-page	63
Abbildung 12: CO₂-Emissionen im Straßenverkehr für SRES Szenarien	66
Abbildung 13: CO₂-Emissionen in verschiedenen Sektoren nach A1B-Szenario.....	67
Abbildung 14: CO₂-Emissionen in verschiedenen Sektoren nach B1-Szenario	67
Abbildung 15: CO₂-Emissionen im Güterverkehr für Deutschland, nach Shell-LKW-Studie 2009, Seite 31	81
Abbildung 16: verschiedene Boxmodelle.....	84
Abbildung 17: Dynamische Entwicklung des weltweiten KFZ-Bestandes, verschiedene Ansätze, eigene Modellierung	87
Abbildung 18: Entwicklung des atmosphärischen CO₂, eigene Modellierung.....	91

Abbildung 19: CO₂-Emissionen von Elektrofahrzeugen	99
Abbildung 20: Energieintensität von Flugzeugen, IEA 2009, Seite 319	108

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: verschiedene CO₂-Rechner aus dem Internet im Überblick.....	II
Tabelle 2: durchschnittliche Kilometeranzahl, IEA Transport and CO₂ Seite 123.....	50
Tabelle 3: Ergebnisse aus IEA Transport and CO₂ 2009 für verschiedene Szenarien ...	51
Tabelle 4: Fahrzeugübersicht nach OPEC, World Oil Outlook 2009, Seite 85.....	53
Tabelle 5: wichtige Ergebnisse aus OPEC World Oil Outlook WOO 2009 (in Klammern Werte des WOO 2010, siehe AMV 1).....	55
Tabelle 6: Ergebnisse der GAINS Studie zur PKW-Entwicklung in ausgewählten Ländern, Angabe in Tausend	61
Tabelle 7: Ergebnisse der GAINS-Studie zur NFZ-Entwicklung für ausgewählte Länder, Abgabe in Tausend	62
Tabelle 8: Übersicht von Ergebnissen der GAINS-Studie für USA, Deutschland und China.....	64
Tabelle 9: QUANTIFY-Ergebnisse für A1B, B1, A2 und B2	68
Tabelle 10: CO₂Pro-Kopf-Emissionen, nach International energy outlook, EIA DOE 2010, Seite 143	73
Tabelle 11: Ergebnisse der UPI-Studie, Folgen einer Massenmotorisierung 1995	74
Tabelle 12: Übersicht für verschiedene Antriebe nach WIKE in Tausend für Deutschland, 2007 Seite 45.....	76
Tabelle 13: Ergebnisse der Shellstudie 2009	79
Tabelle 14: Ergebnisse zum Strahlungsantrieb und Temperaturerhöhung.....	93
Tabelle 15: Verbrauch von verschiedenen Elektrofahrzeugen.....	97
Tabelle 16: Beispiele für alternative Kraftstoffe im Luftverkehr, nach IATA Annual	

report 2009 Seite 33105

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
BIP/GDP	Bruttoinlandsprodukt bzw. Gross domestic product
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bauwesen, Städtebau und Raumordnung
BMWT	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BRIC	Brasilien-Russland-Indien-China (Schwellenländer mit zunehmender wirtschaftlicher Bedeutung)
BtL	Biomass-to-liquid
BTU	British Thermal Unit (1BTU=1055,055 J), Energie zum Erwärmen eines Pfund Wassers um 1°Fahrenheit
CNG	Compressed Natural Gas, komprimiertes Erdgas
CtL	Coal-to-liquid (verflüssigte Kohle)
DLR	Deutsches Luft und Raumfahrtzentrum
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EV	Electric vehicle-Elektrofahrzeug
Gt	Gigatonnen (10^9 Tonnen)
IATA	International Air Transport Association (Zusammenschluss von Luftverkehrsunternehmen)
IEA	International Energy Agency
IMF	International Monetary Fund (Währungsfond)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
JAMA	Japan Automotive Manufacturers Association Japanische Gemeinschaft der Automobilhersteller
kWh	Kilowattstunde
LPG	Liquified Petroleum Gas-Flüssiggas

MJ/PJ/EJ	Mega Peta, Exajoule
Mrd.	Milliarden
OECD	<p>Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung</p> <p>OECD Pacific: Australia, Japan, Korea and New Zealand</p> <p>OECD North America: Canada, Mexico and the United States</p> <p>OECD Europe: Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Luxembourg, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, the Slovak Republic, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey and the United Kingdom</p>
OPEC	Organisation erdölexportierender Länder
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PEM	Protonen-Austausch-Membran
PEV	Primärenergieverbrauch
Pg	Petagramm (10^{15} Gramm)
PHEV	Plug-in-Hybrid
SKE	Steinkohleeinheit 1SKE=29,3076 MJ, freiwerdende Energie bei der Verbrennung von einem Kilo Steinkohle
SRES	Special report on emissions scenarios des IPCC (Zukunftsszenarien)
SUV	Sport Utility Vehicle –Geländewagen
UBA	Umweltbundesamt
UNFFC	United Nations Framework Convention on Climate Change
WEO	World Energy Outlook

Glossar

Annex 1 Staaten	Industriestaaten (EU-27 plus Australien, Neuseeland, Amerika, Kanada, Japan, Weißrussland, Schweiz und Türkei)
Barrel	Amerikanische Maß für Rohöl (159,112 Liter)
Bruttosozialprodukt	Gesamtwert aller innerhalb einer Volkswirtschaft produzierten Waren und Dienstleistungen pro Jahr
Fahrzeugkilometer	Die von den eingesetzten Fahrzeugen geleistete Wegstrecke (Beispiel: 45 Mio. PKW, Jahreswegstrecke 12.000 km, ergibt 540 Mrd. Fzkm)
Memoryeffekt	Ladungsverluste einer Batterie durch teilweise Entladung
Neuer europäischer Fahrzyklus (NEFZ)	Standardisierte Bedingungen um bei einem Neuwagen Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen zu ermitteln
Passagierkilometer	Produkt aus pro Fahrzeug beförderten Passagieren und Fahrzeugkilometer (Beispiel: PKW 1,6 Personen mal 540 Mrd. Fzkm ergibt 864 Pkm.)
Tonnenkilometer	Beförderte Menge an Fracht in Tonnen multipliziert mit den zurückgelegten Kilometer
Umrechnungsfaktor Benzin	1 Liter = 2,33 Kilogramm CO ₂ mit einem Heizwert von 43,6 MJ/kg (Quelle: UBA)
Umrechnungsfaktor Diesel	1 Liter= 2,645 Kilogramm CO ₂ mit einem Heizwert von 42,6 MJ/kg (UBA)
Umrechnungsfaktor Kerosin	1 Liter= 2,520 Kilogramm CO ₂ mit einem Heizwert von 42,6-43,5 MJ/kg (UBA)
Rohöläquivalent	Maßeinheit für Energiequellen bezogen auf Rohöl

1 Einleitung

Der weltweite Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration, gekoppelt mit einer Temperaturerhöhung und einer Niederschlagsveränderung und einer möglichen Verstärkung der extremen Wetterereignisse, wird in Medien, Politik und in der Fachliteratur oft diskutiert. Diese Arbeit soll auch diesem Thema gewidmet sein und ist dabei fokussiert auf die Rolle des Verkehrs am Klimawandel und das Einsparpotenzial von Treibhausgasen durch innovative Antriebe und alternative Kraftstoffe.

Im Jahr 2008 wurden weltweit 8,7 Gigatonnen Kohlenstoff aus fossilen Brennstoffen und der Zementproduktion (entspricht 32 Gigatonnen (Gt) Kohlendioxid (10¹² Kilogramm) in die Atmosphäre emittiert (vgl. Global Carbon Project: Carbon Budget 2008, Corinne Le Queré et al., 2009). Der gesamte Verkehrssektor hat dabei einen Anteil von 23 %; davon entfallen wiederum 70 % auf den Straßenverkehr. In Zahlen sind das insgesamt 5 Gigatonnen. Dabei ist der Anteil des Verkehrs an den gesamten CO₂-Emissionen seit 1990 um über 40 Prozent gestiegen.

Der Verkehrssektor wird in Zukunft einen noch größeren Teil an der CO₂ Belastung ausmachen, da die Anzahl der Fahrzeuge sowie die der Weltbevölkerung steigen wird, aber auch weil in Zukunft vermehrt Kraftstoffe zum Einsatz kommen werden, die z. T. einen höheren CO₂ Ausstoß haben. Beispiele hierfür wären Kraftstoffe aus Kohleverflüssigungsanlagen (s. hierfür Kapitel 3.2.3.2). Diese Entwicklung steht im Gegensatz zu alternativen Kraftstoffen, die versprechen, in naher Zukunft „CO₂“-frei Fahrzeuge betreiben zu können.

Die obigen Daten zeigen die Relevanz des Verkehrs für das sich verändernde Weltklima; Zudem wird prognostiziert, dass die Anzahl der Erdbewohner bis zum Jahr 2030 auf über 8 Milliarden steigen wird, gekoppelt an ein weltweites gesteigertes Bruttoinlandsprodukt. Die Folgen sind, dass sich die Anzahl der Fahrzeuge vom Jahre 2000 bis 2030 von 900 Millionen auf 1,7 und bis zu 2,1 Milliarden mehr als verdoppelt haben wird (vgl. OPEC: *WOO 2009*. S.84) – mit schwerwiegenden ökologischen Konsequenzen.

Die Ingenieure der großen Automobilhersteller investieren in die Forschung und Entwicklung von alternativen Antrieben, wie Hybrid, Elektro- oder Wasserstoffantriebe. Ferner liegt ein großes Augenmerk auf Effizienzsteigerung bzw. Treibstoffreduktion, denn der momentane Durchschnittsverbrauch eines neuzugelassenen Benzinautos (bzw. Dieselfahrzeug) liegt immer noch bei 7,0 L/100 km (bzw. 6.5 L/100 km) mit Emissionsraten von 170 g CO₂/km (bzw. 163 g CO₂/km). Der Mittelwert der aktuellen Fahrzeugflotte liegt dabei aber wesentlich höher aufgrund des relativ hohen Anteils der älteren Fahrzeuge im Straßenverkehr.

Die Energie- und Mineralölkonzerne suchen nach erneuerbaren, umweltschonenden Kraftstoffen und auch die Politik versucht die Brücke zu schlagen zwischen Wirtschaftlichkeit und Naturschutz. Ein ehrgeiziger Vorschlag kommt dabei von der EU mit dem sogenannten *20-20-20 Projekt*: Bis zum Jahr 2020 soll der Anteil der erneuerbaren Energie auf 20% steigen und eine Energieeffizienzsteigerung um 20 % erfolgen, wobei zeitgleich die CO₂-Emissionen um 20% reduziert werden sollen.

Die Internationale Energieagentur (IEA) beziffert die Investitionen auf 2.800 Milliarden US-Dollar-2008 (Zeitraum 2010-2020) bei einem Weltbruttoinlandsprodukt von 54.000 Milliarden in 2007, was etwa 4 % des BIP entspricht. Für den Zeitraum von 2021 bis 2030 werden 9.300 Milliarden US-Dollar angesetzt, um das Ziel eines langfristigen 450 ppm CO₂-eq-Szenarios zu erreichen und damit die Schranke einer 2°C Temperaturerhöhung nicht zu überschreiten (vgl. IEA: *Special Early Excerpt of the World Energy Outlook 2009*, S.19). Dem gegenüber stehen zunächst 5.800 Milliarden Einnahmen durch das Einsparen von Energieträgern; Energiesparen finanziert sozusagen von alleine.

Der britische Ökonom Nicholas Stern hat die wirtschaftlichen Maßnahmen zur Eindämmung des weltweiten Klimawandels im Jahr 2006 mit etwa 1% des Weltbruttoinlandsprodukt, also 65.000 Milliarden US-Dollar, beziffert. Dagegen müssten bis zum 10-fachen des Weltbruttoinlandsproduktes jährlich aufgebracht werden, um die Folgen des ungebremsten Klimawandels zu auszugleichen (Stern Review 2006, S.8). Ein deutscher Auszug des Stern-Reviews ist unter folgendem Link zu finden:

http://www.la21bb.de/service/stern_review.pdf

Methodisch behandelt diese Arbeit die Sammlung von großen Datenreihen, die mathematische Bearbeitung von Daten und die ökologische Modellbildung von Wachstum und Prognose in Form von Szenarien. Grundlegende Literatur und Datenquellen sind dabei die Studien der Internationalen Energieagentur IEA, der vierte Sachstandsberichts des IPCC (2007), der World Economic Outlook WEO des Internationalen Währungsfonds, der World Oil Outlook WOO der OPEC, Daten des Kraftfahrtbundesamts, eine Studie vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie sowie eine Veröffentlichung des Boschkonzerns bezüglich alternativen Antriebssystemen und Kraftstoffen.

Mathematische Grundlage der Modellbildung sind die Arbeiten von Dargay und Gately über „Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030“, sowie die überarbeitete Version von Martin Sommer aus dem Jahr 2007 (vgl. Energy Journal 28, 143-170). In diesen Arbeiten wird ein Bezug zwischen dem pro-Kopf Bruttoinlandsprodukt und der Anzahl der Fahrzeuge pro 1000 Einwohner weltweit hergestellt. Dazu wird ein Koeffizient eingeführt, der die Anzahl der Fahrzeuge pro Einwohner (vehicle ownership) für verschiedene Länder aus der Vergangenheit in Form einer S-Kurve mit Sättigungscharakter abschätzt und die Entwicklung bis ins Jahr 2030 projiziert.

Ziel dieser Arbeit ist es schließlich, aus allen Daten und entsprechenden Berechnungen einen Ausblick auf die CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs zu gewinnen und zu budgetieren, und darüber hinaus Vorschläge zu erarbeiten, welche Verbesserungen aus einer Verlagerung des Personenindividualverkehrs und des Personenflugverkehrs auf den Nah- und Fernverkehr der Bahn oder anderen Niedrigenergieoptionen gewonnen werden können.

In Kapitel 2 werden zunächst Grundlagen wiederholt und wichtige Fakten für das weitere Verständnis gegeben. Danach folgt in Kapitel 3 ein Ausblick über mögliche Zukunftstendenzen der Antriebsmöglichkeiten, CO₂-Entwicklung und Energieeffizienz, die durch Politik, Wirtschaft und den Menschen selbst gesteuert werden können. Im vierten Kapitel werden die Ergebnisse der untersuchten Studien rekapituliert, woraufhin im Anschluss deren Ergebnisse diskutiert und mit eigenen Berechnungen verglichen werden. Der Elektromobilität wird im Abschnitt 6 ein eigenes Kapitel

gewidmet, gefolgt von Ausführungen über weiteren Transportsektoren. Zum Schluss folgen einige Gedanken über die Fortbewegung der Zukunft und die Zusammenfassung der errungenen Erkenntnisse.

2 Grundlagen

2.1 Kohlendioxid

2.1.1 Eigenschaften

Neben den Hauptkomponenten Stickstoff (78%), Sauerstoff (21%) und Argon (1%) in trockener Luft sind Wasserdampf (~0.4%), Kohlendioxid mit aktuell 0,389 Promille oder 389 „parts per million“ Volumenanteile (ppmV) und Methan (1,76 ppmV) die wichtigsten Spurengase in Bezug auf den Treibhauseffekt.

Kohlendioxid ist ein farbloses, geruchloses Gas und die chemische Verbindung aus einem Kohlenstoffatom und zwei Sauerstoffatomen. CO_2 ist in der asymmetrischen Streckenschwingung und in den beiden Biegeschwingungen infrarotaktiv. Die berühmteste Kurve bezüglich des Anstiegs der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre stammt von Charles David Keeling am Mauna Loa Observatorium auf Hawaii, das seit 1958 regelmäßig die CO_2 -Konzentration auf der Nordhemisphäre misst (siehe Abbildung 1). Erster ist von 1958 (315 ppm) in 50 Jahren um 75 ppm auf heute knapp 390 ppm angestiegen. Dies ergibt eine mittlere durchschnittliche Zuwachsrate von 1,4 ppm CO_2 pro Jahr, oder, durch eine Exponentialkurve ausgedrückt, eine mittlere Steigerung von 0.9% jährlich, die allerdings nicht durchgehend gleich ist. Beunruhigend ist vor allem die Steigerung über die letzten 8 Jahre im Mittel von 3,6 % (vgl. Corinne Lequeré. 2009).

Weitere Berechnungen zur Mauna Loa Kurve sind auf der Anhangs-CD unter AMK 1-Mauna Loa CO_2 Anstieg und Modellierung zu finden.

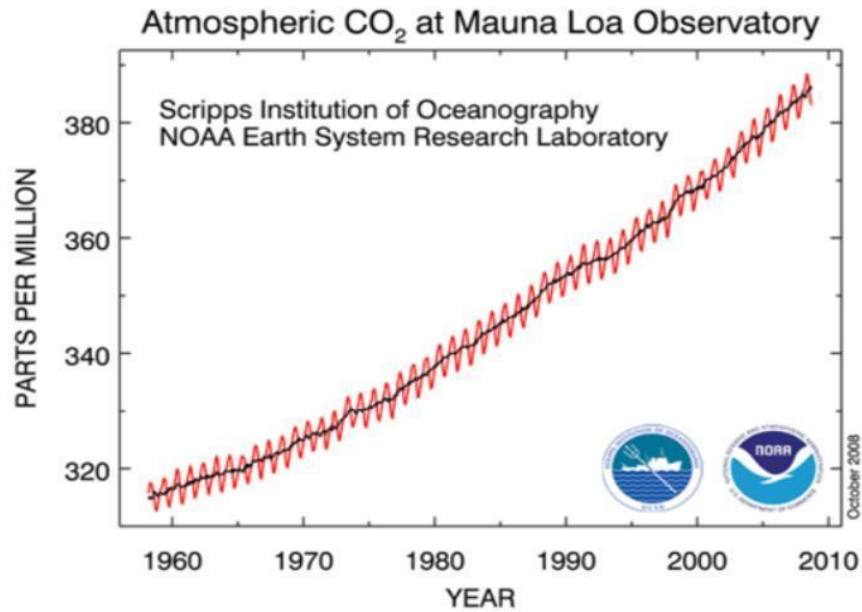


Abbildung 1: Mauna Loa Kurve, http://www.europa.clio-online.de/Portals/_Europa/images/default/E_Uekoetter_Geschichte_der_Umwelt_abb.jpg

Durch die weltweite anthropogene Störung der Atmosphäre wird die Konzentration von Kohlendioxid weiterhin ansteigen, denn selbst wenn alle geplanten Umwelt- und Klimaschutzprogramme sofort durchgesetzt würden und der CO₂-Ausstoß quasi über Nacht eingestellt werden würde, wären die positive klimatischen Auswirkungen erst Jahrzehnte später spürbar.

Die für die Umwelt relevanteste Eigenschaft von CO₂ ist die Absorption und Rückstrahlung von langwelliger Wärmestrahlung, die sogenannte Infrarotaktivität. Abbildung 2 illustriert den Energiehaushalt der Erde, mit der Einstrahlung von kurzwelligem Licht und der Ausstrahlung von langwelligem Licht.

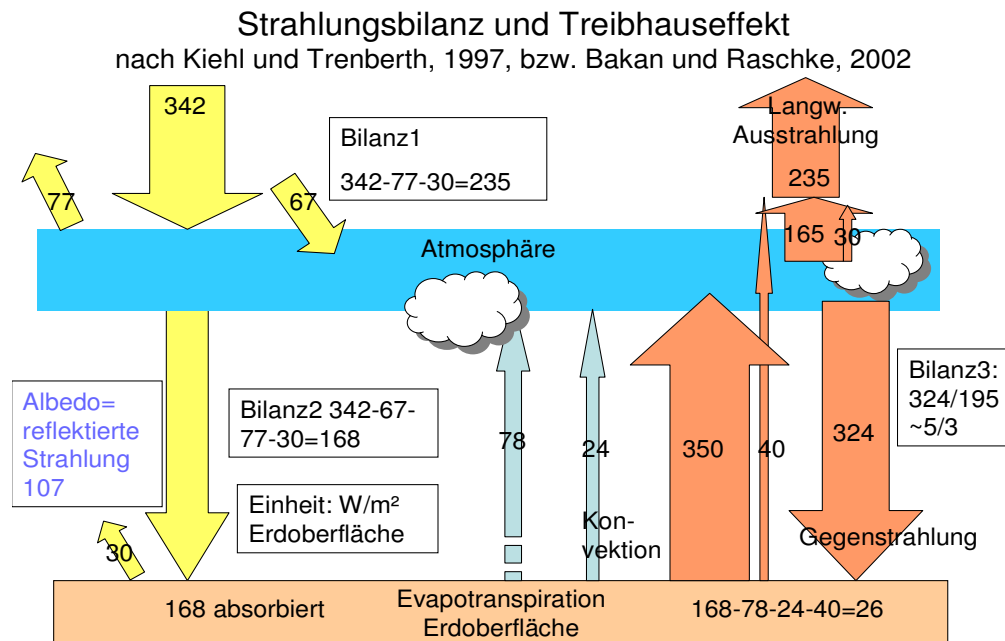


Abbildung 2: Energiehaushalt der Erde, Arbeitskreis G. Kohlmaier

Die von der Sonne emittierte kurzwellige Einstrahlung wird mit $1.368 \pm 2 \text{ W/m}^2$ (Solarkonstante) festgesetzt; Durch die Form der Erde und der Geometrie zwischen Erde und Sonne wird im Mittel genau ein Viertel der Einstrahlung pro m^2 Bodenfläche empfangen (342 W/m^2 -globales Mittel).

Durch die globale Albedo (107 Watt/m^2 entsprechend, etwa 31%) und die Absorption in der Atmosphäre (67 Watt/m^2) kommen 168 W/m^2 im Mittel am Erdboden an. Als Albedo bezeichnet man die das Rückstrahlungsvermögen einer Oberfläche, ohne die Strahlung umzuwandeln. Im Fall der Erde werden rund 30% der einfallenden Strahlung direkt zurückgestrahlt.

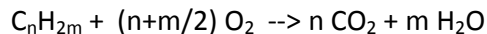
Die Theorie besagt, dass man bei einem Strahlungsantrieb von 1 W/m^2 (Input 1 Watt größer als der Gleichgewichtsoutput) ungefähr mit einem langfristigen Gleichgewichtstemperaturanstieg von $0,5$ bis $1,3^\circ\text{C}$ (Mittelwert $0,8^\circ\text{C}$) rechnen kann. Eine Kombination aus allen Treibhausgasen des Kyoto-Protokolls (CO_2 , CH_4 , N_2O , fluorierte u. perfluorierte KW und SF_6) ergibt heute einen Strahlungsantrieb von $2,63 \pm 0,26 \text{ W/m}^2$; Hinzu kommt dann noch troposphärisches Ozon, das ebenfalls Treibhaus-

verstärkend wirkt, während Verbrennungsruße und Aerosole zusammen mit dem Wolken-Albedo-Effekt, negativ wirken. Dies führt zu einer Gesamtstrahlungsbilanz von etwa $1,6 \text{ W/m}^2$ (vgl. IPCC: *Technical Summary*, S.31)

2.1.2 Quellen

In Zahlen gemessen ist die Verbrennung von fossilen Energieträgern wie Kohle, Erdgas oder Erdöl der wichtigste anthropogene Eintragspfad in die Atmosphäre. Die zugrunde liegende chemische Reaktion lautet, vereinfacht unter Berücksichtigung von nur C und H im Energieträger:

[Gilt nur für Kohlenwasserstoffe]



Zum Beispiel CH_4 mit $n=1, m=2$ $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$

Die Verbrennung energiebedingter Prozesse hat 2008 einen Anteil von 8,7 Gt C oder 31,9 Gt CO_2 (Faktor $44/12$ oder $11/3=3,667$), der Anteil aus Landnutzungsänderung mit Schwerpunkt Entwaldung beträgt 1,2 Gt C oder 4,4 Gt CO_2 , zusammen also 9,9 Gt C oder 36,3 Gt CO_2

(vgl. Global Carbon Project 2009

http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/09/files/GCP2010_CarbonBudget2009_22November2010.pdf).

Das CDIAC des Oak Ridge National Laboratory gibt für 2007 8,365 Gt C aus fossilen Brennstoffen an unter Einschluss der Zementproduktion (0,377 Gt C) und der Gasabfackelung (0,054 Gt C) (vgl. http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2007.ems).

Das IEA berichtet in guter Übereinstimmung mit den beiden anderen Quellen für das Jahr 2007 von 7,9 Gt C oder 29,0 Gt CO_2 aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe.

2.1.3 Budget

Aus den oben gegebenen Daten kann man für 2007 und ähnlich für andere Jahre ableiten, dass 1,2 Gt C aus 9,9 Gt C durch Landnutzungsänderungen bedingt sind (12%), während der Rest auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe einschließlich der Zementproduktion und des Abfackelns zurückgeht. In der Zeitperiode von 2000 bis 2008 verblieben 4,1 Gt oder Pg C, was 45% der Gesamtemission entspricht, in der Atmosphäre; 3,0 Gt C oder 29% gingen zurück in die Landbiosphäre und 2,3 Gt C oder 26% in die Ozeane. In der Literatur werden zwei unterschiedliche Airborne Fraktionen (wörtlich: *in der Luft verbleibende Anteile*) diskutiert: zum einen die Airborne fraction, die sich auf den gesamten Input auf CO₂ bezieht – in diesem Fall 45% –, und zum anderen der Bruchteil, der von den Fossilen Brennstoffen in der Atmosphäre verbleibt – über lange Jahrzehnte der frühen Mauna Loa Messungen hinweg von C.D. Keeling mit 56% angegeben. Für die heutigen Verhältnisse würden diese 4.9 Gt C ergeben. Offensichtlich ist der Bruchteil, der in der Atmosphäre verbleibt, etwas kleiner geworden. Der weltweite Kohlenstoffkreislauf wird in Abbildung 3 dargestellt: die grünen Zahlen sind dabei die Stoffaustauschflüsse zwischen den Kompartimenten; die roten Ziffern stellen den zusätzlichen anthropogenen Einfluss dar. An den jeweiligen Kompartimenten sind in schwarzen Zahlen die Reservoirgrößen in Gigatonnen angegeben.

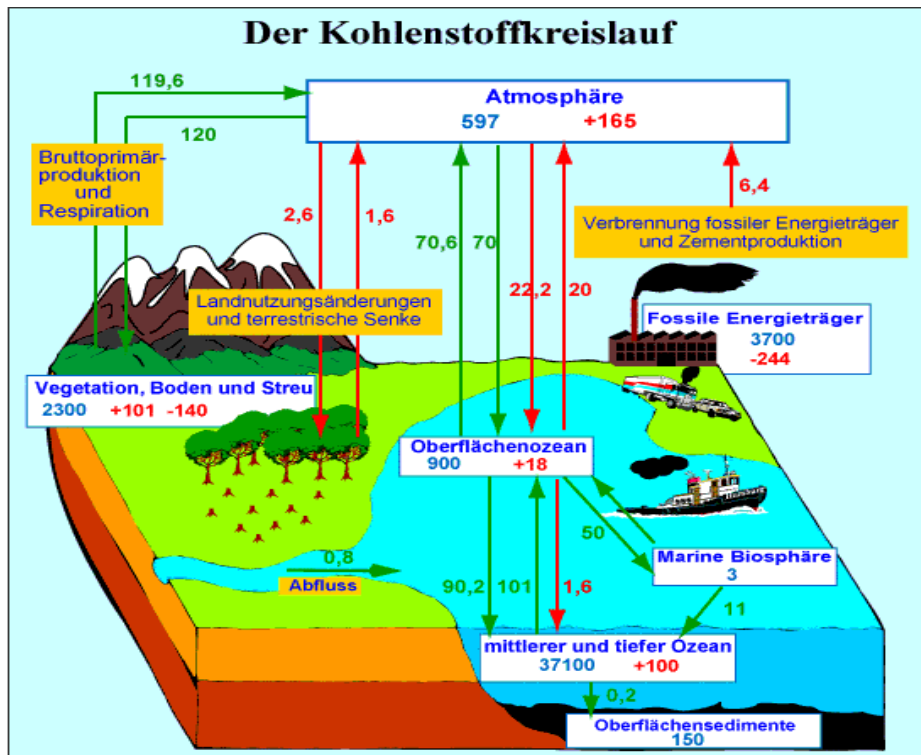


Abbildung 3: Flüsse und Bestände beim ungestörten und durch den Menschen gestörten globalen Kohlenstoffkreislauf

(Quelle: http://www.klimaktiv.de/media/07/40_klima/01_grafik_sheets_karten/Germanwach/kohlenstoffkreislauf.JPG)

Mit der Störung des Kohlenstoffkreislaufs ist eine Veränderung der Strahlungsbilanz von kurzwelliger Einstrahlung und langwelliger Ausstrahlung (Infrarot) verknüpft, deren Energiedifferenz in Bezug auf den ungestörten Zustand als Strahlungsantrieb (Radiative Forcing RF) bezeichnet wird. Der AR-4 (2007) des IPCC beschreibt die Komponenten des Strahlungsantriebs bezogen auf den Referenzzustand im Jahr 1750 mit folgenden Werten: Treibhausgase: CO₂ 1,6 W/m², Methan 0,45 W/m², N₂O 0,2 W/m², halogenierte Kohlenwasserstoffe 0,3 W/m². Zusätzlich entsteht durch die Luftverschmutzung troposphärisches Ozon mit einem RF-Wert von etwa 0,3W/m², während andererseits eine Reihe Substanzen zu nennen sind, welche die Albedo erhöhen, also abkühlend wirken, mit einem negativen Strahlungsantrieb wie Rußpartikel und Aerosole.

Der Strahlungsantrieb ΔRF bezüglich der atmosphärischen CO_2 -Konzentration zu einem gewählten Zeitpunkt t in der Gegenwart oder in der Zukunft, kann mit folgender empirischen logarithmischen Beziehung des Verhältnisses von CO_2 zur Zeit t relativ zum CO_2 zu Beginn der Industrialisierung (278 ppm) nach Gl. 1 berechnet werden:

$$\Delta RF(t) = 5,35 * \ln\left(\frac{[CO_2(t)]}{[CO_2(vorindustriell)]}\right) \quad (1)$$

http://www.climate.unibe.ch/~joos/vorlesung/ccycle/Kap1_einleitung_ss06_7nov06.pdf (vgl. S.10)

Für eine CO_2 -Verdopplung wird der Wert $\Delta RF = 3,7 \text{ Watt/m}^2$ erreicht. Die Summe aller Strahlungsantriebe ist mit der zu erwartenden Temperaturerhöhung über die Temperatursensibilität $\lambda = dT/dRF \text{ [}^\circ\text{C/(Watt/m}^2\text{)]}$ verknüpft, mit welcher der Strahlungsantrieb multipliziert wird. Hierbei kann λ aus der Strahlungsbilanz direkt abgeleitet werden und hat den Wert $0,27 \text{ }^\circ\text{C/(Watt/m}^2\text{)}$, wenn Rückkopplungen, z.B. wie die durch Wasserdampf und Wolken, vernachlässigt werden. In Falle einer CO_2 -Verdopplung beträgt die Temperaturerhöhung dann $\Delta T = 0,27 * 5,35 * \ln(2) = 1,00^\circ\text{C}$. Unter Einschluss der oben genannten Rückkopplungen ist der Wert höher, wobei die Ergebnisse 3-dimensionalen Zirkulationsmodelle um den Verstärkungsfaktor 3,0 zwischen 2,0 und 4,5 streuen, entsprechend $\lambda = (0,54 - 1,22)$

Damit gilt:

$$\Delta T([CO_2(t)]) = (0,54 - 1,22) * 5,35 * \ln\left(\frac{[CO_2(t)]}{[CO_2(vorind.)]}\right) \quad \text{beziehungsweise}$$

$$\Delta T([CO_2(t)]) = \frac{1}{\ln(2)} \ln\left(\frac{[CO_2(t)]}{[CO_2(vorind.)]}\right) * (2,0^\circ - 4,5^\circ\text{C})$$

(2)

So gilt z. B. bei einer CO_2 -Verdopplung unter Berücksichtigung der Rückkopplungen für den unteren Wert in der zweiten wie in der ersten Formulierung $\Delta T = 0,54 * 5,35 * 0,693 = 2,0^\circ\text{C}$.

2.2 Energiebudget

2.2.1 Energiebudget von Deutschland

Der Primärenergieverbrauch pro Kopf und Jahr in Deutschland lag 2008 bei 177 GJ, entsprechend 49 MWh, und ist somit um rund 13% höher als der Durchschnitt der EU 27. Der durchschnittliche Amerikaner verbraucht zum Vergleich 323 GJ pro Jahr.

Der Primärenergieverbrauch (PEV) liegt in Deutschland für das Jahr 2008 bei rund 14.280 PJ (Petajoule). Davon werden rund 12.000 importiert und 4.000 werden im eigenen Land produziert, von deren Summe etwa 2.000 PJ in den Export und Bunkerung fließen. Vom Primärenergieverbrauch von 14.280 PJ gehen 1030 PJ in den nichtenergetischen Verbrauch; 3.570 PJ gehen durch die Umwandlungen als Wärme verloren, ein weiterer Teil wird von den Energiesektoren von 520 PJ selbst verbraucht, so dass 8.600 PJ in den Energieendverbrauch und davon alleine 2.600 PJ (28%) in den Verkehr fließen (siehe Abbildung 4).

Die Zusammensetzung des Energiemixes wird sich in den kommenden Jahren verändern, denn durch die Verabschiedung des Erneuerbaren Energiegesetzes (EEG) soll im Jahr 2020 mindestens 30% des erzeugten Stromes aus erneuerbaren Energien stammen. Zudem sieht das Biokraftstoffquotengesetz vor, dass 8% des Kraftstoffes aus Biosprit bestehen.

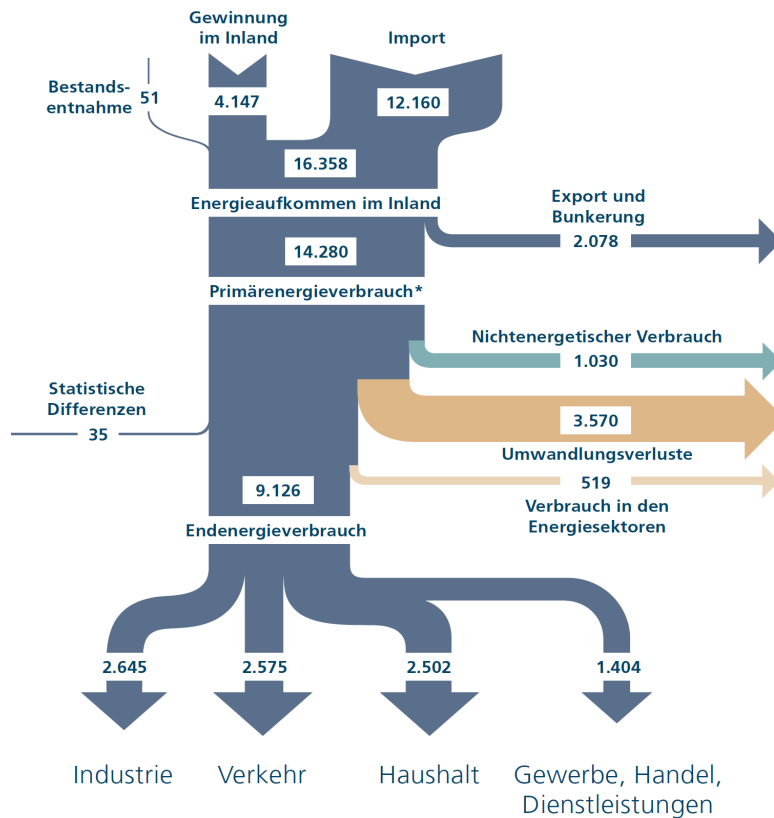
Der Verkehr in Deutschland nutzt 28,2 % der Endenergie, die sich aus dem Straßenverkehr (23,2%), dem Schienenverkehr (0,84%), dem Flugverkehr (4,2%) und der Küsten- und Binnenschifffahrt (0,06%) zusammensetzen (vgl. AG Energiebilanzen 2008: <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=63>).

Automobilhersteller und Lobbyisten hingegen versuchen ständig, diese Zahlen zu verschönern und behaupten gerne, es wären nur 18%, also rund 10% weniger als die Studienergebnisse zeigen.

An dieser Stelle sei auch erwähnt dass der internationale Flugverkehr, sowie die Schifffahrt (noch) nicht budgetiert werden, da es nicht geklärt ist welchen Ländern die

Emissionen zugeordnet werden müssen.

Energieflussbild 2008 für die Bundesrepublik Deutschland in Petajoule



Der Anteil der erneuerbaren Energieträger am Primärenergieverbrauch liegt bei 8,7 %.

* Alle Zahlen vorläufig/geschätzt.

29,308 Petajoule (PJ) \triangleq 1 Mio. t SKE

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 09/2009

Abbildung 4: Energieflussbild Deutschland 2008 (AG Energiebilanzen 2009 in Energie für Deutschland BMWT 2009, Seite 18)

<http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=62>

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) beziffert die Weltreserven an fossilen Brennstoffen auf 34.735 EJ (Exajoule 10^{18} J) bei einem derzeitigen Welt-PEV von etwa 500 EJ heute, entsprechend einer mittleren Dauer von 70 Jahren.

Allgemein gilt: Reserven sind Rohstoff-Lagerstätten, die bereits entdeckt sind und nachweislich aktuell wirtschaftlich abbaubar sind – und auch rechtlich abgebaut werden dürfen. Ressourcen bezeichnen hingegen die weltweit vorhandene Gesamtmenge eines Rohstoffs, die in Zukunft gewonnen werden kann. Die Ressourcen in Deutschland sind ausschließlich Braunkohle (76 Mrd. Tonnen) und Steinkohle (186 Mrd. Tonnen) und würden beim derzeitigen Verbrauch noch rund 1.300 Jahre reichen ungeachtet der Wirtschaftlichkeit der Förderung. Es sind auch geringe Mengen an Erdöl und Erdgas vorhanden; diese sind aber nicht zu einem marktfähigen Preis abbaubar (vgl. BMWi: *Verfügbarkeit und Versorgung von Energiestoffen*, S.4/5).

Die Bundesregierung hat 1997 im Rahmen des Kyoto-Protokolls zugesagt, ihre Emissionen bis zur Zeitperiode 2008-2012 um 21 % bezogen auf das Niveau von 1990 zu senken. Dieses Ziel konnte unter anderem durch die Modernisierung der ehemaligen DDR-Anlagen realisiert werden. Weitere Maßnahmen waren Energiesparvorrichtungen, Wärmedämmungen, Modernisierungsmaßnahmen und die ökologische Steuerreform.

Das höchste Einsparpotenzial liegt in der Energieeffizienz. Dafür ist allerdings ein hohes Startkapital nötig, um die Entwicklung innovativer und ressourcenschonender Technologie zu fördern.

Doch wie sieht es hier im Verkehrssektor aus? Das Verkehrsaufkommen und damit auch der Energieverbrauch steigen stetig; Zudem dauert der Produktlebenszyklus eines durchschnittlichen Fahrzeugs im Schnitt 15 Jahre, bis es schließlich durch eine energieeffizientere Variante ersetzt wird. Das höchste Potenzial liegt demnach in der Ersetzung alter Fahrzeuge, da der Trend zu kleinen, kompakten Treibstoff-sparenden Autos geht. Ferner setzen die Automobilhersteller vermehrt auf Dieselmotoren: jeder zweite in Deutschland zugelassen Neuwagen wird mit Diesel betrieben, da die Energieeffizienz höher liegt und es steuerliche Vorteile gegenüber Benzinmotoren gibt. Der durchschnittliche Verbrauch eines neu zugelassenen Benzinfahrzeuges liegt bei 7,0 l/100 km und bei Diesel bei 6,5. Dies entspricht 170 g CO₂ pro Kilometer bei Benzin und 163 g CO₂ bei Diesel, also ein Unterschied von nur 4%. Diese Tendenzen sind positiv zu beurteilen. Allerdings ist der durchschnittliche Verbrauch nach Angaben des Kraftfahrtbundesamtes in den letzten 15 Jahren aber nur um rund 1,5 l/100 km

gesunken. Die EU-Kommission wünscht sich allerdings eine europaweite Einführung eines CO₂ Grenzwertes pro Kilometer auf 120 g CO₂/km. Wie schnell daher die angestrebten Werte des Kyoto-Protokolls allein durch Erneuerungen in der Automobilbranche erreicht werden können, muss in Zukunft weiter kritisch beobachtet werden und scheidet momentan wohl an der geringen Entschlusskraft der Automobilhersteller.

2.2.2 weltweites Energiebudget

Anhand einer Studie der IEA (International Energy Agency) aus dem Jahr 2009 lassen sich Aussagen und Prognosen über Verbrauch, CO₂-Emissionen, Bevölkerungswachstum und für die Entwicklung der CO₂-Effizienz von Kraftwagen machen. Im Grunde wurden zwei mögliche Szenarien beleuchtet:

Das Referenzszenario (RS) beschreibt das weitere Vorgehen, indem bestehende Umweltschutzprogramme zwar laufen, aber keine Verbesserung oder Erneuerungen mit sich bringen. Der Energieverbrauch, die Weltbevölkerung und die CO₂-Emissionen (von 29 Gt in 2007 auf 40 Gt im Jahr 2030) steigen in diesem Szenario bis zu Jahr 2030 weiter an (vgl. IEA: *Special early Climate change excerpt*, S.19) Das RS ist kein Instrument, um Zukunftstrends zu prognostizieren; es stellt mehr einen Ausblick über mögliche Konsequenzen für Mensch und Umwelt dar, wenn der Mensch sein Tun und Handeln nicht überdenkt. Man darf dies aber keinesfalls als „worst-case“ Szenario betrachten, da aktuelle Umweltschutzprogramme sowie geplante Maßnahmen im RS bereits berücksichtigt werden. Summiert man alle Treibhausgase und projiziert deren Konzentration bis ins Jahr 2050, endet diese laut RS bei rund 1.000 ppmV.

Das 450 ppm CO₂-eq-Szenario nimmt die 2°C Politik zur Grundlage seiner Berechnungen. 450 ppm CO₂-eq (CO₂ Äquivalentkonzentration, im Folgenden kurz 450 ppm genannt) umfasst dabei alle sechs IPCC-Klimagasgruppen. Dieses Ziel setzt eine atmosphärische Konzentration der Treibhausgase von 450 ppm im Jahre 2100 voraus. Die 2°C sind zudem eine gemittelte Annahme; der Schwankungsbereich liegt bei 1,4 bis 3,1°C. In diesem Szenario würden die Emissionen sowie die atmosphärische Konzentration einen Höhepunkt erreichen: Emissionen im Jahre 2020 werden mit 30,9

Gt und Konzentration mit 510 ppm im Jahre 2035 angegeben und sollen danach bis zum Jahr 2100 zum gewünschten Wert abklingen. Dieses Szenario scheint schon jetzt mit seinen ehrgeizigen Zielen bis 2020 schon nicht mehr zu schaffen zu sein.

Im Referenzszenario steigen die weltweiten energiebedingtem Emissionen von 28,8 Gt (2007) auf 34,5 (2020) und 40,2 im Jahre 2030 (siehe Abbildung 5). Dabei entfallen in den Jahren 2020 bzw. 2030 43% bzw. 44% der Emissionen auf die Energieproduktion und 23% auf den Transportsektor. Der Unterschied in anderen Bereichen wie Industrie, Gebäudeemissionen und dergleichen zwischen den beiden Szenarien ist marginal und kann hier unberücksichtigt bleiben (vgl.: IEA: *Special early Climate change excerpt*, S.19)

Das ökologisch orientierte 450-Szenario sieht einen Anstieg der Emissionen in 2020 auf nur 30,7 Gt; danach würden die Emissionen ein paar Jahre stagnieren, bevor sie sich im Jahr 2030 auf dem niedrigeren Niveau von 26,4 Gt CO₂ einstellen. Dabei entfallen im Jahre 2030 29% oder 7.65 Gt auf den Transport.

Folgendes Schaubild veranschaulicht die oben beschriebenen Szenarien und deren Prognosen:

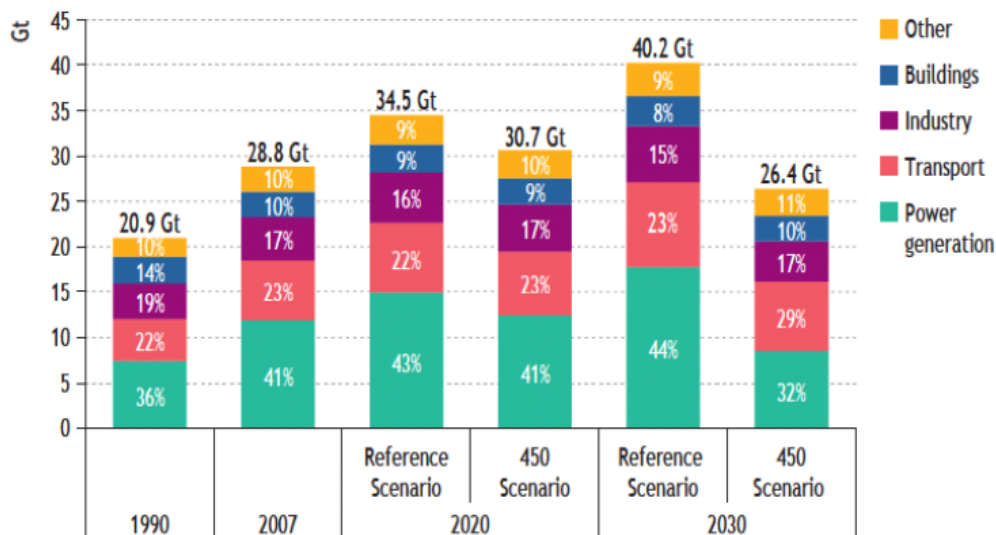


Abbildung 5: Vergleich zwischen Referenz und 450 ppm Szenario, IEA

Das Einsparpotential an Emissionen, aber auch die damit verbundenen Kosten sind also in den beiden Bereichen Energieerzeugung und Transport am größten. Die IEA-Studie berücksichtigt in den Szenarien nicht die Entwicklung der Weltbevölkerung

sowie des Bruttosozialproduktes. Die Bevölkerung soll aber bis zum Jahre 2030 auf über 8,2 Milliarden und das BIP auf 137 Billionen US \$ gestiegen sein.

Weiter sinkt der durchschnittliche Ausstoß von CO₂ pro Kopf im 450 ppm auf 3,2 Tonnen. Im Referenzfall hingegen steigt er auf 4,9 Tonnen an.

Nach dem 450-Szenario verspricht sich die IEA einen Rückgang von Verbrennungsmotoren beim Verkauf von Neuwagen um über 50%. Dass würde einem Rückgang der spezifischen CO₂-Emissionen in g/km von durchschnittlich 205 im Jahr 2007 auf 90 im Jahr 2030 entsprechen.

Die IEA hat über den Zeitraum von 2010 bis 2030 eine Investitionssumme von 12.100 Milliarden US-Dollar hochgerechnet, damit die Ziele des 450-Szenarios realisiert werden können (nach Abbildung 6). An erster Stelle stehen die Investitionen in Effizienzverbesserung, gefolgt von erneuerbaren Energie und Biobrennstoffen, Kernenergien und nicht zuletzt der CCS (carbon sequestration and storage)-Technologie.

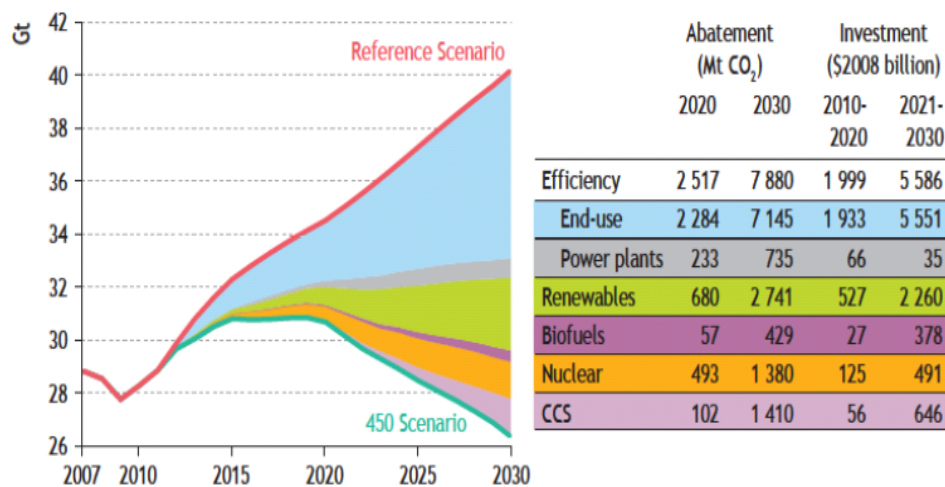


Abbildung 6: IEA Investitionen in verschiedenen Energiesektoren, IEA

Die IEA hat auch detaillierte Vorschläge für die Teilbereiche der Welt wie die OECD-Länder, die USA, die EU, Russland, China, Indien u.a zur Erreichung des 2°C Ziels ausgearbeitet. Danach sind in der EU Investitionen von 1.800 Milliarden über die nächsten 20 Jahre zu leisten. Mit dieser Maßnahme könnte in der EU die pro-Kopf-

Emission auf 4,5 Tonnen (450 ppm Szenario) CO₂/pro Kopf sinken, gemessen am Referenzszenario von bis zu 6,9 Tonnen CO₂.

Um diese Ziel auf dem Verkehrssektor zu erreichen, müssten nach Meinung der IEA die PKW Neuwagenflotte auf 40% mit reinen Verbrennungsmotoren beschränkt werden; etwa 30% würden Hybrid-Fahrzeuge ausmachen, 22% wären Hybridfahrzeuge, die auch Strom tanken können (Plug-in-Hybride) und etwa 8% wären reine Elektrofahrzeuge. Dieser Inhalt wird in Abbildung 7 dargestellt.

Es ist im Allgemeinen nicht damit zu rechnen, dass die Daten für das Szenario 450 ppm zu realisieren sind, da die Zeit einfach zu knapp ist und die Investitionskosten dafür zu hoch sind.

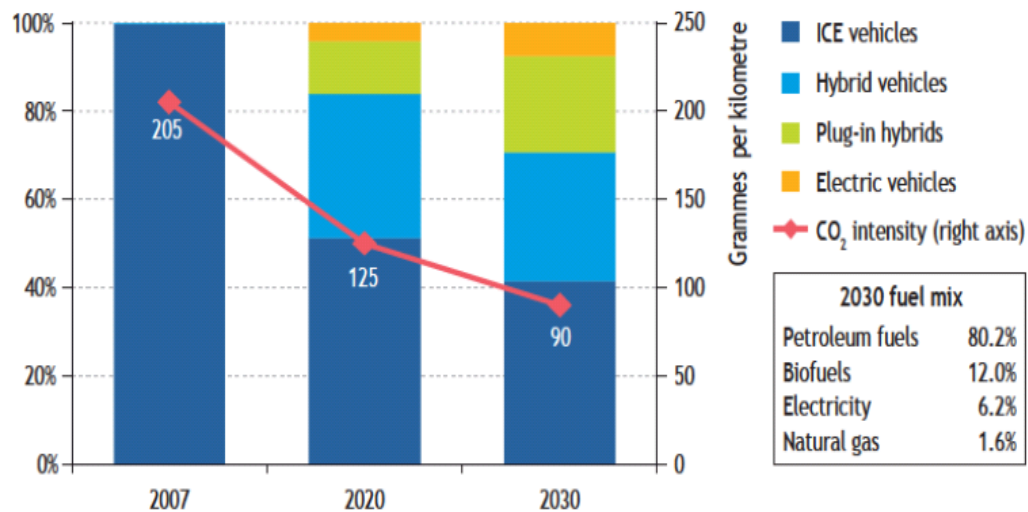


Abbildung 7: CO₂-Intensität im 450 ppm Szenario

Auf der Anhang-CD können unter L16-IEA climat excerpt die Abbildungen 5-7 nachgelesen werden und sind zudem auch für China, Indien, die USA und Europa verfügbar.

2.3 Politische Rahmenbedingungen

Bestimmungen der Politik sind nur in dem Maße sinnvoll, in dem erneuerbare Energien nachhaltig, energieeffizient und wirtschaftlich gewinnbringend eingesetzt werden können. Auf bereits erfolgte Maßnahmen soll nun im Folgenden näher eingegangen werden.

2.3.1 Deutsches Erneuerbare Energien Gesetz

Das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) ist im März 2000 in Kraft getreten, die letzte Veränderung kam im Januar 2009. Die damalige Bundesregierung hat dieses Gesetz erlassen, um die Förderung und den Ausbau von erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung voranzutreiben und den Anteil bis 2010 mindestens zu verdoppeln. Die Fassung von 2009 setzt eine Erhöhung des Anteils auf 30 % bis 2020 voraus.

Das Gesetz beinhaltet sowohl einen Anreiz für die Anbieter erneuerbarer Energien – die Einspeisung wird über 20 Jahre festvergütet – als auch eine Verpflichtung für selbige, denn die Stromanbieter sind verpflichtet, verfügbaren Biostrom einzuspeisen (vgl: Peter Hennike: *Erneuerbare Energie*, S.37)

2.3.2 Umweltschutzprogramme der EU

Das wichtigste und ehrgeizigste Gesetz ist das sogenannte 20-20-20 Programm aus dem Jahr 2007. Es umfasst eine Erhöhung der erneuerbaren Energien um 20 %, eine Effizienzsteigerung um 20%, eine Schadstoffemissionsreduktion um 20% gegenüber 1990 und dies alles bis zum Jahr 2020. Zudem soll der Import von Erdöl oder Strom schrittweise reduziert werden um einerseits das Klima zu schonen und andererseits die EU-Bürger vor Preisschwankungen zu schützen. An dieser Stelle sei erwähnt, dass der nukleare Anteil des Strommixes in der EU erhöht werden soll. Die Lobby der Kernenergie setzt ihr Hauptargument auf die CO₂-freie Produktion von Strom ungeachtet des Atommülls und des ungelösten Problems der Endlagerung.

Die wichtigste Maßnahme innerhalb der EU ist die Steigerung der Effizienz: so ist die Plakette für Elektrogroßgeräte schon Pflicht, die die Geräte für den Verbraucher ersichtlich in Energieeffizienzklassen einteilt; Im Jahr 2012 sollen weitere Plaketten

beispielsweise für Reifen eingeführt werden. Die EU hat zudem ihr Interesse auf die Effizienzsteigerung von privaten, öffentlichen und Geschäftsgebäuden gelegt, die 36% der Energie verbrauchen. Finanziell will die EU für die genannten Maßnahmen rund 4 Milliarden Euro zur Verfügung stellen.

(http://europa.eu/legislation_summaries/energy/european_energy_policy/en0012_en.htm)

2.3.3 Maßnahme für den Verkehr

Die EU fordert eine Festlegung auf einen durchschnittlichen CO₂-Grenzwert von 120 g CO₂/km. Bis zum Jahr 2006 galt bei den Automobilherstellern noch eine Selbstverpflichtung; diese hat aber zwischen 1995 bis 2004 nur eine Reduktion bei Neuwagen von 186 g CO₂/km auf 163g gebracht. Bei Nichteinhaltung des Grenzwertes sollen den Automobilherstellern Sanktionen drohen. Alternativ werden für die Produktion von spritsparenden Modellen oder Elektrofahrzeugen Gutschriften, sogenannte „super credits“, gewährt, mit denen Fahrzeuge mit Mehrverbrauch kompensiert werden können. Zudem werden Forschungsgelder vergeben, die sich mit Effizienzsteigerung, alternativen Kraftstoffen, alternativen Antrieben und neuen Technologien oder Werkstoffen beschäftigen. Dabei geht es im Weiteren neben Reduktion von Treibhausgasen auch um Vermeidung von Luftschadstoffen wie CO, NO_x, Kohlenwasserstoffen und Feinstaub.

Um diese Entwicklung weiter voranzutreiben, haben sich die Mitgliedsstaaten der EU verpflichtet, ihren Anteil an Biokraftstoffen bis Ende dieses Jahres auf mindestens 5,75 % bzw. 8% im Jahr 2015 zu erhöhen.

2.4 Modellierungsgrundlagen

Mithilfe von Szenarien werden historische Daten verarbeitet und für die Zukunft extrapoliert. Dabei werden die Modelle zusätzlich mit mehreren Randbedingungen gespeist und in verschiedenen Varianten durchlaufen, um eine möglichst große Spannweite an Ergebnisse zu bekommen. Auch in vorliegender Arbeit werden solche Szenarien verwendet. Dabei richtet sie sich nach dem zugrundeliegenden Modell des

IMAGE 2.2 Programm (Integrated Model to Assess the Global Environment) aus dem Jahr 2002, das vom niederländischen Umweltamt publiziert wurde (vgl. <http://www.pbl.nl/en/themasites/image/index.html>).

IMAGE teilt die Welt in 22 Bereiche ein, die sich in meteorologischen Daten, also in Temperatur, Druck und Niederschlag, ähneln. Dabei wird eine globale Auflösung von $0,5 \times 0,5$ Grad – was ungefähr einer $55 \cdot \cos(\text{Breitengrad}) \times 55$ km Auflösung entspricht – erreicht. Im Programm sind Kalkulationen bis ins Jahr 2100 möglich. Ergänzend sei gesagt, dass die Fehlerspannweiten bei zeitlich fortschreitenden Prognosen für die Zukunft in beispielsweise 10, 20 und 30 Jahren immer weiter auseinander gehen: je weiter man also versucht in die Zukunft zu schauen, desto spekulativer auch das Szenarienergebnis.

Für IMAGE werden gesammelte Daten der Jahre 1765-2000 zum Initialisieren der Szenarien genutzt; zur Kalibrierung werden Daten von 1970-2000 herangezogen. Schon für den IPCC-Bericht der Jahre 2001 und 2007 wurden von mehreren Autoren zusammen folgende Zukunftsszenario, sogenannte SRES (Special Reports on Emission Scenarios) vorgeschlagen und diskutiert:

Das **A1-Szenario** besagt, dass die Globalisierung voranschreitet, das Bevölkerungswachstum moderat ist und ab Mitte des 21. Jahrhundert rückläufig sein wird. Das Szenario ist geprägt durch starkes ökonomisches Wachstum. Es existieren noch drei Unterszenarien: Das A1F-Szenario geht davon aus, dass wirtschaftliches Handeln auf der ausschließlichen Verwendung von fossilen Brennstoffen basiert. Im A1B-Szenario hingegen werden als Energiequellen werden sowohl fossile wie erneuerbare Ressourcen genutzt, ein sogenannter **Balanced-Energiemix**. Das A1N-Szenario nutzt Energie vorwiegend aus **neuen umweltschonenden Technologien**.

Im **A2-Szenario** liegt der Fokus weniger auf der Entwicklung der Globalisierung sondern auf vermehrtem regionalem Handeln unterschiedlicher Machtblöcke, geprägt von einem hohen Populations- und einem geringerem Wirtschaftswachstum.

Das **B1-Szenario** geht von einer globalisierten Welt aus, in der wirtschaftliches Handeln

vermehrt durch den Dienstleistungssektor geprägt ist. Dabei werden vermehrt neue, saubere und ressourcenschonende Technologien entwickelt und eingesetzt.

Die Welt der **B2-Szenarien** schließlich setzt auf lokale Lösungen der wirtschaftlichen, sozialen und umweltorientierten Nachhaltigkeitsfragen.

(<http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>)

2.5 Grundlagen zur Physik der Bewegung eines Autos

Die Physik lehrt uns, dass beim PKW, wie auch bei anderen Fahrzeugen, 4 Widerstandskräfte zu überwinden sind: der Rollwiderstand, der Luftwiderstand, der Beschleunigungswiderstand und der Fahrwiderstand bei der Bergfahrt. Dabei ist also Arbeit zu leisten, für die ein entsprechender Energieaufwand aufzubringen ist. Die Rollwiderstandskraft ergibt sich aus $F_R = f_R \cdot m \cdot g$ mit f_R dem spezifischen Rollwiderstandsbeiwert, m der Masse und g als Erdbeschleunigung, die Rollwiderstandsleistung aus $P_R = F_R \cdot v$ mit v als die Geschwindigkeit des Fahrzeugs.

(http://www.mmew.fh-giessen.de/personen/professoren/herzog/download/documents/Kfz-Antriebe/Kfz_Antriebe_2_EnergiebedarfKfz.pdf)

F_R und P_R sind der Masse des Fahrzeugs und dem Rollwiderstand der Reifen auf der gegebenen Straßenoberfläche proportional, eine Reduktion des Gewichts des Fahrzeug und spezieller Leichtlauf-Reifenprofile erniedrigen also den Energieaufwand. Die Luftwiderstandskraft ist dem Luftwiderstandsbeiwert, der projizierten Fahrzeugquerschnittsfläche, der Dichte der Luft und dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional ($F_L = c_w \cdot A \cdot \rho / 2 \cdot v^2$; $c_w(\text{Polo})=0,33$); eine Reduktion der Geschwindigkeit erniedrigt hier den Energieaufwand. Der Fahrwiderstand bei der Bergfahrt, der Steigungswiderstand ist wiederum proportional zur Masse des Auto und dem Sinus des Anstiegswinkels α ($F_S = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$); allerdings wird hier der Rollwiderstand gleichzeitig modifiziert zu $F_R = f_R \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha)$; beim Hybrid kann dann hier bei der entsprechenden Talfahrt ein Teil der geleisteten potentiellen Energie zurück gewonnen werden.

Schließlich wird der Beschleunigungswiderstand bestimmt durch die Masse und die Beschleunigung des Fahrzeugs a ($F_B = m \cdot a$), wobei dann hier noch die Veränderung des Drehmoments der Räder mitberücksichtigt wird. Auch hier kann beim entsprechenden Bremsvorgang beim Hybrid ein Teil der Beschleunigungsenergie zurück gewonnen werden.

Dabei muss nun der Antrieb die notwendige Energie zur Überwindung dieser Widerstandskräfte leisten. Der Antriebswirkungsgrad ist bei Verbrennungsmotoren im Gegensatz zu Elektromotoren sehr klein, er beträgt bei Diesel heute im Durchschnitt etwa 20% (maximale mögliche Wirkungsgrade 30-40%), bei Benzinmotoren etwa 15% (maximal 25-35%). Dies steht im Gegensatz zu den Elektromotoren mit Wirkungsgraden von etwa 80 bis 85%.

Helmut Tschöke von der Universität Magdeburg (<http://www.uni-magdeburg.de/MWJ/MWJ2001/tschoeke.pdf>) hat am Beispiel des 3l-Lupo untersucht, welche Veränderungen theoretisch notwendig wären, um zum 1 Liter-Auto mit Verbrennungsmotor zu kommen. Zusammengefasst lauten die Ergebnisse:

Massenreduktion von 855 kg auf 400 kg; Luftwiderstandsflächen-Reduktion von 0,57 auf 0,24, und Steigerung des Antriebswirkungsgrad von 0,24 auf 0,32.

3 Mögliche Veränderungen

3.1 Politik

Nur mithilfe politischer Unterstützung wird es möglich sein, die notwendigen und geplanten Umweltschutzmaßnahmen durchzusetzen. Im folgenden Abschnitt wird beleuchtet, welche Pläne existieren und wie viel Einsparpotenzial sie haben.

3.1.1 Einführung einer Geschwindigkeitsbegrenzung

Das Problem bei einer Geschwindigkeitsbegrenzung ist die Festlegung der Grenze und die strikte Überprüfung dieser. Eine merkliche Abnahme im Spritverbrauch um 30 % auf Autobahnen ist erst spürbar, wenn die maximale Geschwindigkeit bei 90 km/h liegt (vgl. Rüüd: *Quo Vadis Auto?* S.119)

Im gesamten europäischen Ausland gilt eine Begrenzung auf Autobahnen zwischen 110 km/h bis 130 km/h. Die europäische Kommission fordert auch von Deutschland eine Einführung des Tempolimits, was aber durch verschiedene Lobbys abgewehrt wird, die die Interessen der Automobilhersteller vertreten. Wenn aber eine gesetzliche Vorgabe bestehen würde, gäbe dies den Automobilherstellern einen Motivationsgrund, ihre Produkte für einen Geschwindigkeitsbereich bis 110 km/h zu optimieren und den Spritverbrauch weiter zu senken. Durch Baustellen, Stau, Geschwindigkeitsbegrenzungen und Blockieren durch andere Fahrzeuge allerdings liegt die durchschnittliche Geschwindigkeit in Deutschland ohnehin schon zwischen 100 und 140 km/h, von freiem Fahren kann daher selten die Rede sein (vgl. Rüüd: *Quo Vadis Auto?* S.92). Eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf deutschen Autobahnen, die allgemein immer noch als Schnellfahrerparadies betrachtet werden, würde daher dem Einzelnen gar nicht so viel Freiheit abverlangen, wie es Lobbyisten und Schnellfahrer befürchten.

3.1.2 Einführung eines CO₂-Grenzwertes

Die Europäische Union hat die schrittweise Einführung eines Grenzwertes für CO₂-Emissionen von Neuwagen verabschiedet. Dieses Gesetz sieht vor, dass 65% der Neuwagen ab dem Jahr 2012 nicht mehr als 120 g CO₂/km im genormten Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) emittieren dürfen. Deren Anteil soll im Jahr 2013 auf 75% und 2014 auf 80% gesteigert werden.

Ab 2015 müssen alle Neuwagen diesen Wert erreichen (vgl. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2007:0019:FIN:DE:PDF>).

Der geforderte Grenzwert von 120 g bis zum Jahr 2012 ist für die internationale Fahrzeugkonstruktionsvereinigung OICA unrealistisch, da der Produktionszyklus eines PKW bei 6-7 Jahren liegen und die Entwicklung nochmals bei mindestens 5 Jahren beträgt. Anders gesagt: Die Flotte von 2012 wird größtenteils schon heute produziert (vgl. OICA: *Geneva presentation*, Folie 13)

Der Fahrzyklus legt fest, unter welchen Bedingungen und mit welchen Geschwindigkeitsabläufen ein Fahrzeug bei der Ermittlung von CO₂-Emissionen und Energieverbrauch betrieben wird. Dennoch liegen der eigentliche Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen im Normalbetrieb für den KFZ-Fahrer oft erheblich über den unter künstlichen Bedingungen ermittelten NEFZ-Werten, was für den Endverbraucher schwerwiegende Fehleinschätzungen führen kann: Für den Hersteller drohen bei Nichteinhaltung der Vorgaben empfindliche Sanktionen; bei einer Überschreitung von über 4 Gramm Kulanz werden bis zu 95 Euro für jedes zusätzliche Gramm CO₂ und Fahrzeug in der Flotte fällig.

Aus der Massenbilanz des Treibstoffs, chemisch gesprochen aus der Stöchiometrie, lässt sich eindeutig die CO₂-Emission festlegen; es liegt als eine eins-zu-eins-Beziehung zwischen dem Treibstoffverbrauch und der CO₂-Emission vor, wie in folgenden Beispielen demonstriert werden soll:

Beispiel 1: Emission Diesel

$$\text{Emission-Diesel [g CO}_2\text{/km]} = \text{Spritverbrauch [L/100km]} * 26,5 \quad (3)$$

Will man hier eine CO₂-Emission von 120g/km erreichen, so ergibt durch einen Dreisatz einen durchschnittlichen Spritverbrauch von 4,53 Litern Diesel auf 100 Kilometern.

Beispiel 2: Emission Benzin

$$\text{Emission-Benzin [g CO}_2\text{/km]} = \text{Spritverbrauch [L/100 km]} * 23,7 \quad (4)$$

Ergibt einen Kraftstoffverbrauch von 5,06 Litern pro 100 Kilometern.

Beispiel 3: Compressed Natural Gas

$$\text{CNG- Faktor [g CO}_2\text{/km]} = \text{Verbrauch [L/100 km]} * 17,9 \quad (5)$$

Beispiel 4: Liquified Petroleum Gas

$$\text{LPG-Faktor [g CO}_2\text{/km]} = \text{Verbrauch [L/100km]} * 16,3 \quad (6)$$

(alle Umrechnungsfaktoren vgl. KBA: *Fahrzeugzulassungen*, S.29)

Heutzutage sind Automobilhersteller durchaus fähig, die oben diskutierten Grenzwerte einzuhalten, aber auch der Verbraucher muss seinen Beitrag leisten, indem er gewillt ist, in energiesparende Kraftfahrzeuge zu investieren und im Gegenzug dazu aber auch auf Komfort wie Klimaanlage oder übermäßige PS-Zahlen zu verzichten. Zudem wird es auch in Zukunft interessant bleiben, welche Lösungen bzw. Sonderregelung es für Sportwagenhersteller und Fahrer geben wird, die diese Werte nicht einhalten können.

3.2 Technische Errungenschaften

In diesem Kapitel sollen die technischen Innovationen betrachtet werden, die es ermöglichen sollen, den Kraftstoffumsatz und somit die CO₂-Emissionen zu senken.

Dazu gibt es folgende Lösungsansätze:

- Reduktion von Gewicht durch neue Werkstoffe und Vermeidung von schweren Einbauten wie Klimaanlage oder elektrischen Fensterhebern
- Verringerung des Luftwiderstands
- Senkung der Reifenreibung
- Erhöhung des Wirkungsgrades in einem Verbrennungsmotor
- Konstruktion alternativer und energieeffizienter Antriebe
- Förderung erneuerbarer und emissionsarmer Kraftstoffe

Die letzten beiden Aspekte der innovativen Antriebe und Kraftstoffe werden auf den nächsten Seiten genauer diskutiert.

3.2.1 Hybridantrieb

Eine kurzfristige Umrüstung der Fahrzeugflotte auf rein elektrischen Antrieb erscheint utopisch, da dies eine technische Unmöglichkeit darstellt. In Anbetracht der Effizienzsteigerung und der Reduktion von Emissionen sind Hybridantriebe hingegen

aber eine echte Alternative. In Hybridfahrzeugen sollen die Stärken von Elektromotoren und Verbrennungsmotoren miteinander kombiniert werden und somit deren Schwächen ausgleichen.

Verbrennungsmotoren mit flüssigen Brennstoffen benötigen keinen Druckbehälter, weisen ein geringes Volumen auf und haben eine hohe Energiedichte, haben aber leider nur einen geringen Wirkungsgrad (20-30%). Als weiterer Nachteil kommt hinzu, dass Verbrennungsmotoren nicht selbstständig starten können, wofür ein Anlasser benötigt wird, der durch einen Elektromotor betrieben wird. All diese Bauteile wirken sich wegen der zusätzlichen Gewichtsbelastung der Einzelbauteile negativ auf die Energiebilanz von Verbrennungsmotoren aus. Bei gasförmigen Kraftstoffen ist zudem noch ein Hochdruckbehälter notwendig, der durch sein hohes Eigengewicht den Wirkungsgrad weiter herabsetzt.

Beim Elektromotor hingegen steigt die Effizienz auf 80-90%, zudem entfallen viele Bauteile; der Motor liefert nach dem Start sofort ein hohes Drehmoment und fährt fast geräuschlos und emissionsfrei. Allerdings wird die hohe Endeffizienz erkaufte mit dem immer noch relativ geringen Wirkungsgrad bei der Umwandlung von thermischer in elektrische Energie im Kraftwerk (in Deutschland im Kohlekraftwerk ~38%, weltweit im Durchschnitt ~31%, in China ~21%). Der größte Nachteil von Elektromotoren liegt aber in der Speicherung von elektrischer Energie: Um eine hohe Reichweite zu generieren, werden viele Batterien benötigt, die das Gewicht des Fahrzeugs sowie den Anschaffungspreis erheblich erhöhen.

Im Gegensatz zu Verbrennungs- und Elektromotor bietet der Hybridantrieb zahlreiche Vorzüge: Beim Hybridantrieb wird der Verbrennungsmotor beim Anlassen durch eine E-Maschine unterstützt. Diese hat zwei Funktionen: Als Motor treibt sie das Fahrzeug elektrisch an, als Generator hilft sie, Bewegungsenergie beim Bremsen in elektrische Energie umzuwandeln. Dies wird in der Fachsprache als *Rekuperation*, also als Rückgewinnung, bezeichnet. Bei Wartephasen, wie bei Ampeln oder im Stau, wird der Verbrennungsmotor abgestellt. Dadurch wird Kraftstoff eingespart; erst beim erneuten Starten wird der Verbrennungsmotor wieder aktiviert.

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Bauarten von Elektrohybriden beschrieben und deren Vor- und Nachteile aufgeführt. Zunächst einmal sollen im

Folgenden die Gemeinsamkeiten beschrieben werden:

- Start/Stop Systeme: in Ruhephasen wird der Verbrennungsmotor abgeschaltet und sobald die Kupplung betätigt wird, wird der Motor mithilfe des Elektromotors schnell und leise gestartet. Start/Stop Systeme haben ein Einsparpotenzial von 3,5 % bis 4,5% Kraftstoff nach NEFZ (vgl. Bosch: *Hybridantriebe, Brennstoffzelle und alternative Kraftstoffe*, S.8).
- Elektrischer Energiespeicher
- Möglichkeit zur Rückgewinnung der Bremsenergie

Um eine höhere CO₂-Reduktion zu bewerkstelligen, wird der Hybrid unter einem hohen Wirkungsgrad betrieben. Ein hoher Energiedurchsatz wirkt sich aber negativ auf die Lebensdauer einer Batterie aus, was einen möglichen Nachteil des Hybridantriebs darstellt. (vgl. Rüd: *Quo vadis Auto?* S. 55)

3.2.1.1 Serieller Hybrid

Verbrennungsmotor und Elektroantrieb werden in Reihe geschaltet. Es sind zwei Elektromotoren notwendig: Einer arbeitet als Motor, der andere als Generator. Antriebsachse und Verbrennungsmotor sind nicht miteinander verbunden (S. Abbildung 8).

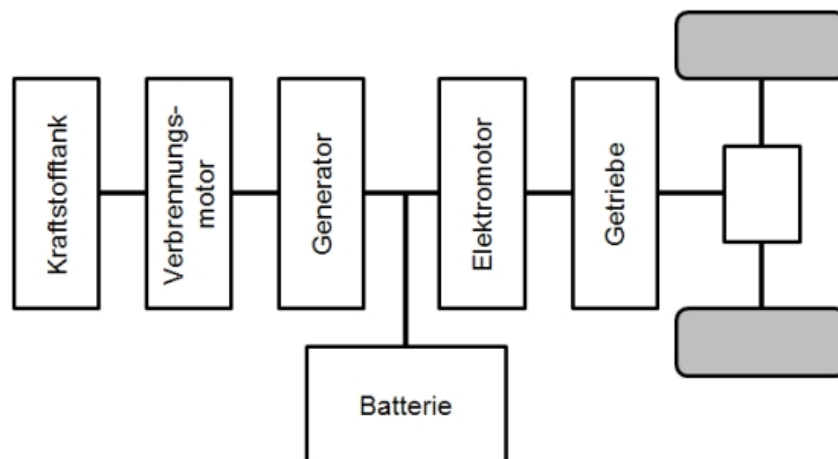


Abbildung 8: Aufbau eines seriellen Hybridantriebes

(Quelle: <http://www.greengear.de/wp-content/uploads/2010/03/Hybrid-Serieller-Hybrid.jpg>)

Das Funktionsprinzip des seriellen Hybrides ist wie folgt: Der Verbrennungsmotor liefert Bewegungsenergie, diese wird vom Generator in elektrische Energie umgewandelt und dem Elektromotor zu Verfügung gestellt. Je nach Fahrverhalten wird die Energie auf die Antriebsachse oder auf die Batterie übertragen. Elektromotoren müssen so ausgewählt werden das sie die vom Verbrennungsmotor erzeugten Energien auch verarbeiten können. Vorteile des seriellen Antriebs sind daher, dass der Betriebspunkt des Verbrennungsmotors gut gesteuert werden kann; dadurch kann der Hybrid sehr schadstoffarm betrieben werden. Mögliche Nachteile allerdings sind, dass die zwei Elektromotoren auch ein hohes Eigengewicht haben und dass durch die mehrmalige Energieumwandlung relativ hohe Verluste bis zu 30% zu befürchten sind (vgl. Bosch: *Hybridantriebe, Brennstoffzelle und alternative Kraftstoffe*, S.10).

Vermehrtes Einsatzgebiet des seriellen Hybridantriebs sind hauptsächlich Nutzfahrzeuge, die einen hohen Start- und Stopp-Betrieb haben, wie z.B. Stadtbusse oder Müllfahrzeuge.

3.2.1.2 Parallel Hybrid

Beim Parallel-Hybrid sitzen Verbrennungsmotor und ein Elektromotor auf einer Kurbelwelle. Die Drehmomente werden addiert, während die einzelnen Anteile individuell eingestellt werden können; dies ermöglicht eine Kombination aus kleinen Motoren bis 8-Takt Verbrennungsmotoren. Der Elektromotor kann kleiner dimensioniert werden, dadurch spart man an Gewicht und gewinnt an Platz.

Parallel Hybride können noch durch verschiedene Auslegungen der Kupplung unterschieden werden. Dem interessierten Leser wird dabei das Buch „Hybridantriebe, Brennstoffzellen und alternative Kraftstoffe“ der Firma Bosch empfohlen.

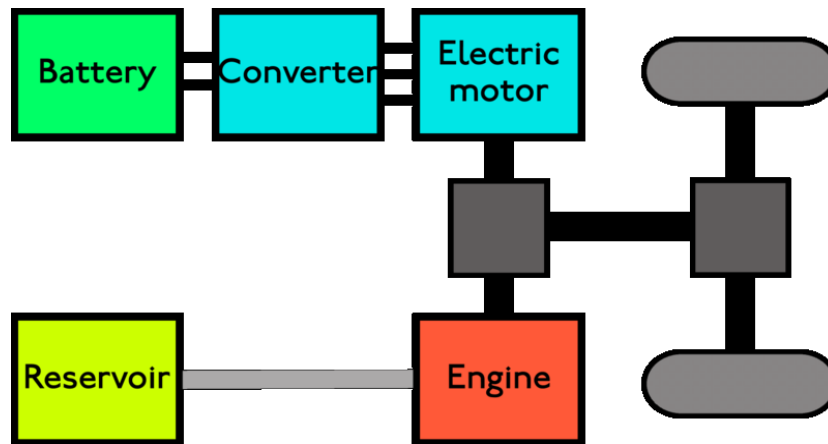


Abbildung 9: Aufbau eines Parallel Hybridantriebes

(Quelle: <http://thegreenstep.com/wp-content/uploads/2010/07/parallel-hybrid-electric-vehicle.png>)

Vorteil des Parallelhybrides ist, dass beim Betrieb kaum Umwandlungsverluste entstehen; bei nachlassender Elektroleistung kann zusätzlich die Achse rein über die Verbrennungsmaschine mechanisch betrieben werden. Mögliche Nachteile sind, dass es weniger Freiheit bei der Wahl des Betriebspunktes gibt.

3.2.1.3 Mild Hybrid

Beim Mild Hybrid wird die Bremsenergie zurück gewonnen und das Drehmoment des Verbrennungsmotors elektronisch unterstützt. Der Elektromotor fällt in dieser Bauart relativ klein aus; er ersetzt im Grunde die Lichtmaschine und unterstützt den Verbrennungsmotor beim Anlassen. Mild Hybride werden als Parallelhybrid realisiert, sie sitzen auf derselben Kurbelwelle. Ein Beispiel ist der Honda Civic, bei dem der Einsatz von Hybrid eine CO₂-Reduktion auf 109 g CO₂/km zur Folge hatte. Die Kraftstoffeinsparung kann in einem Mild Hybrid bei bis zu 15 % (NEFZ) liegen. (vgl. Bosch: *Hybridantriebe, Brennstoffzelle und alternative Kraftstoffe*, S. 8)

Reines elektrisches Fahren ist mit einem Mild Hybrid nicht lange möglich, da der Verbrennungsmotor nicht von der E-Maschine abgekoppelt werden kann, sondern mitgeschleppt wird.

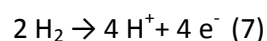
3.2.1.4 Full Hybrid

Bei einem Full Hybrid ist der Verbrennungsmotor abkoppelbar; der Elektromotor muss daher für langes reines elektrisches Fahren mit einem großen Elektrospeicher versehen sein, was wiederum viel Platz kostet und das Gewicht erhöht. Vollhybride können nach dem seriellen oder parallelen Aufbau konstruiert werden. Für den Vollhybrid wurden Metallhybridbatterien entwickelt, die eine hohe Speicherdichte aufweisen aber auch den Belastungen durch Ladung standhalten. Diese haben aber heutzutage ein Eigengewicht von 50 kg (vgl. Rüüd: *Quo vadis Auto?* S. 59). Kraftstoffeinsparungen im neuen europäischen Fahrzyklus sind bis zu 30% möglich. (vgl. Bosch: *Hybridantriebe, Brennstoffzelle und alternative Kraftstoffe*, S.9).

Technisch ist es zudem möglich, Full Hybride durch so genannte Plug-in-Hybride zu ergänzen. Dabei besteht die Möglichkeit, den Elektromotor durch eine externe Stromversorgung aufzuladen. Dafür müssen aber große Batterien eingesetzt werden um häufiges Tanken zu vermeiden und es müsste eine Infrastruktur für diese Art von Tankstellen generiert werden.

3.2.2 Brennstoffzelle

Der als Energieträger verwendete Wasserstoff (H_2) kann in zwei Bauarten als Brennstoff dienen, zum einen im direkten Verbrennungsmotor mit Sauerstoff, der hier nicht näher besprochen wird, und zum anderen als Brennstoffzelle in der Strom für einen Elektromotor erzeugt wird. In der Brennstoffzelle (engl. fuel cell) laufen an der Anode, mit Wasserstoff umspült, und an der Kathode, mit Sauerstoff oder Luft umspült, die jeweils mit einem Katalysator (meist Platin) beschichtet sind, unterschiedliche chemische Reaktionen ab. An der Anode wird Wasserstoff mithilfe von Katalysatoren unter gleichzeitiger Abgabe von Elektronen an den Stromleiter oxidiert. Dieser Prozess wird mit folgender Reaktionsgleichung beschrieben:



Die eingesetzte Membran ist semipermeabel, das heißt, sie lässt Protonen passieren, und wird deshalb auch Proton Exchange Membrane (PEM) genannt. Ist der Elektrolyt ein Polymer, so steht die Abkürzung PEFC für Polymer Electrolyte Fuel Cell. Während

die Elektronen über einen Stromleiter von der Anode zur Kathode gehen, wird an der Kathode, die wiederum katalytisch wirksam ist, das Sauerstoffmolekül gespalten und die entstehenden O-Atome gleichzeitig reduziert. Vereinigung von O^{2-} mit $2H^+$ führt dann zu Wasser.

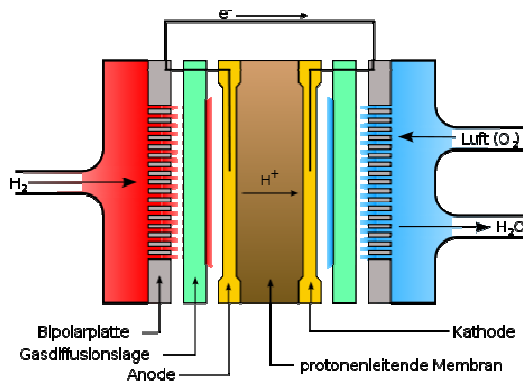


Abbildung 10: Wirkungsweise Brennstoffzelle

Die Reaktion hat also nur reines Wasser als Emission und ist damit umweltfreundlich. Eine Brennstoffzelle kann theoretisch eine Spannung von 1,23 V erzeugen, unter realen Bedingungen werden 0,5 V bis 1 V erreicht. Um einen PKW antreiben zu können werden Brennstoffzellen in sogenannten Stacks produziert. Ein Stack besteht aus 300 bis 450 Zellen und erzeugt dadurch eine Spannung von 300 bis zu 450 Volt. Um als Bauart in PKWs Verwendung zu finden, müssen die Stacks kompakt, leicht, mechanisch stabil und resistent gegen entstehende Abwärme sein (vgl. Bosch: *Hybridantriebe, Brennstoffzelle und alternative Kraftstoffe*, S.57)

Nach einer Studie der „National Hydrogen Association“ werden über 90 % des weltweiten Wasserstoffs in den USA produziert, also rund 9 Millionen Tonnen. Um eine flächendeckende Infrastruktur für Wasserstoff in den USA zu schaffen, müssen 9 Milliarden Dollar für insgesamt weitere 6.500 Tankstellen investiert werden. Die NHA spricht von einem Marktanteil von 10 % im Jahr 2023, die Anschaffungskosten sollen

bereits 2018 Profit abwerfen. Mithilfe von anderen alternativen Antrieben, wie Hybrid, Plug-in-Hybrid, Ethanol Hybrid und Brennstoffzellen, will die NHA die Treibhausgasemissionen um 80 % gegenüber 1990 senken und dabei 600 Milliarden Dollar einsparen (vgl. NHA: *Evolution Report*, S.2 und folgende)

Wasserstoff ist das leichteste Element des Periodensystems und weist eine Energiedichte unter Normaldruck von 2,3 kWh/m³ auf. Mit einem Liter gasförmigen Wasserstoff unter Normaldruck könnte man 3 Meter fahren; dies bedeutet man braucht effektiven Speichermedien wie Druckspeicher, Flüssigspeicher, Metallhydrid oder Nanographitfasern um diesen alternativen Antrieb vermarkten zu können. Denn die gewichtsbezogene Energiedichte ist mit $1,2 \cdot 10^5$ kJ/kg fast dreimal so hoch wie bei Benzin.

3.2.3 Alternative Kraftstoffe

An alternativen Kraftstoffen wird aus verschiedenen Beweggründen geforscht, sei es die Suche nach einer Alternativen zu fossilen Brennstoffen, oder die Hoffnung auf umweltschonendere Kraftstoffe oder einfach der Einfallsreichtum von Entwicklern. Gleich am Anfang dieses Teilkapitels sei auf die Problematik mit der Konkurrenz von alternativen Antrieben aus nachwachsenden Rohstoffen und der Nahrungsmittelproduktion hingewiesen, oder wie es der Umweltanalytiker Lester Brown formulierte in einem Essay formulierte: „Die Bühne ist frei für den Konflikt zwischen den 800 Millionen Autobesitzern und den weltweiten 2 Milliarden Allerärmsten, die nur überleben wollen.“(vgl. Spiegel Special: Neue Energien, S.68) Denn wie schön auch die Auswege aus dem fossilen Jahrtausend erscheinen, die Mobilität einiger Weniger darf nicht im Konflikt stehen mit dem Hunger Vieler. Man benötigt beispielsweise für die Herstellung einer Tankfüllung mit Bioethanol eines Geländewagens soviel Getreide wie ein erwachsener Durchschnittsmensch benötigt, um ein Jahr zu überleben. Daher wird die Diskussion über umweltfreundliche Antriebe noch um eine ethische Komponente erweitert (vgl. Spiegel Spezial: *Neue Energien* 2007, S. 68).

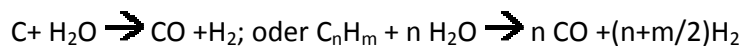
3.2.3.1 Biodiesel

Die Grundlage von Biodiesel sind tierische oder pflanzliche Fette, das jeweilige Ausgangsprodukt passt sich den örtlichen Begebenheiten an. In Europa wird das Öl der Rapspflanzen verwendet. Um das höher molekulare Triglycerid des Rapsöls in einen niedrigmolekularen Ester umzuwandeln, der dem Dieselöl ähnlicher ist, erfolgt eine Umesterung mit Methanol. Nach diesem Prozess erfolgt noch ein Aufarbeitungsschritt, in dem das freigewordene Glycerin gereinigt und der Ester durch eine weitere Destillation vom überschüssigen Methanol befreit wird. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften unterliegen einer strengen Verordnung der EN 14214. In Deutschland wird reines Biodiesel nur in Nutzfahrzeugen oder Stadtbussen eingesetzt, eine Beimischung von 7 Prozent hat sich mittlerweile etabliert.

Die Kohlenwasserstoffemission ist höher als beim Normaldiesel, auch der Spritverbrauch kann durch Schwankungen in der Energiedichte höher liegen. Momentan liegt der Steuersatz für Biodiesel noch unter dem des Normaldiesels, dies soll sich aber im Jahr 2012 ändern.

3.2.3.2 Synfuels

Als Grundlage für die synthetischen Kraftstoffe können Kohle, Erdgas oder auch Biomasse dienen. Mit der Kohlevergasung bzw. mit dem Dampf-Reformierungsverfahren wird zunächst ein Synthesegas aus Wasserstoff und CO hergestellt:



Mithilfe der Fischer-Tropsch Synthese können aus diesem Gemisch, unter der Einwirkung Eisen oder Kobalt-Katalysatoren, Kraftstoffe hergestellt werden.



Aber vor allem der Weg aus fossilen Rohstoffen flüssige Energieträger herzustellen ist aus Umweltsicht bedenklich, da bei der Nutzung wie bei allen fossilen Energieträgern

CO₂ entsteht. Doch gerade in kohlenreichen und wirtschaftlich expandierenden Ländern wie China oder Australien in Zukunft von Bedeutung sein.

Folgende drei technische Varianten zur Herstellung von Kraftstoffen aus Kohle, Biomasse und Erdgas stehen zur Verfügung:

1) Coal-to-liquid (CtL)

Die Kohle wird auf 1.000 ° C erhitzt; dabei entsteht das Synthesegas Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Das Gas wird an Katalysatoren zu n-Paraffinen (geradkettige Kohlenwasserstoffe) synthetisiert. Je nach gewünschten Eigenschaften können weitere Syntheseschritte eingebaut werden. Bei diesem Verfahren wird ungefähr doppelt soviel CO₂ freigesetzt, wie bei normalen Ölverbrennungen. In China sind zwei weitere Kohleverflüssigungsfabriken in Planung, sieben bereits in Betrieb.

2) Biomass-to-liquid (BtL)

Chemisch gesehen laufen die gleichen Prozesse wie in Prozess 1) ab; die Ausgangsprodukte sind hierbei landwirtschaftliche Biomasse oder biogene Recyclingstoffe. Die Rohstoffe werden dabei pyrolysiert (ohne Zufuhr von Sauerstoff zusetzt) und dann einer Fischer-Tropsch-Reaktion unterworfen. In Deutschland wird eine Pilotanlage von Coren betrieben, deren Jahresproduktion liefert momentan aber keine marktfähigen Biokraftstoffe.

3) Gas-to-liquid (GtL)

Bei diesem Prozess wird technisch Erdgas mit Sauerstoff und Wasserdampf versetzt und es entsteht wiederum das Synthesegas. Große Vorteile dieses Verfahrens sind, dass Erdgas aus bis zu 98 % aus Methan besteht, es weltweit verfügbar ist und es nur geringen technischen Aufwands bedarf, die Reaktionen durchzuführen

3.2.3.3 Bioethanol

Zur Produktion von Bioethanol werden hauptsächlich Mais, Roggen oder Weizen benutzt. Getreidesorten also, die einen hohen Zucker und Stärkeanteil aufweisen. Durch ein Enzym wird Stärke in Zucker umgewandelt; anschließend entsteht durch Fermentation und Trocknung Bioethanol. Bioethanol kann sehr gut normalen Verbrennungsmotoren zugemischt werden, in Europa hat sich ein Prozentsatz von 5 % durchgesetzt, in Amerika hingegen schon von 10%. Die größten Produzenten von Bioethanol sind Brasilien und USA, 2006 wurden in beiden Ländern 14 Millionen Kubikmeter hergestellt (vgl. Bosch: *Hybridantriebe, Brennstoffzelle und alternative Kraftstoffe*, S.82)

3.2.3.4 Autogas

Autogas, im englischsprachigen Raum auch bekannt unter liquid petroleum gas (LPG), ist eine Mischung aus Propan und Butan. Durch den geringeren Kohlenstoffanteil im Brennstoff liegen die CO₂-Emissionen rund 10 % unter den Normalmotoren, die Reichweite reduziert sich aufgrund der geringeren Energiedichte um 25 Prozent. Das Gasgemisch verflüssigt sich bei 4 bar, um ein vergleichbares Tankvolumen zu generieren muss der Tank um rund 30% höher ausfallen. Die Umrüstungskosten werden bei Internetanbietern ab 1.300 Euro angeboten.

4 Aussagen der verschiedenen Studien mit Schwerpunkt Straßenverkehr

In Kapitel 4 werden die wichtigsten Ergebnisse der untersuchten Studien dargestellt und die Daten zur Klimaverträglichkeit des Verkehrs präsentiert.

4.1 Transport, Energy and CO₂, International Energy Agency 2009

An erster Stelle steht der World Energy Outlook, der jedes Jahr erscheint und dessen Executive Summary 2009 gerade frei verfügbar im Internet erschienen ist (http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/WEO2009_es_english.pdf). Ein ausführlicher Studienband 2009 wurde für diese Untersuchung frei von der IEA, Paris zur Verfügung gestellt. Auch die Ausgabe von 2008 ist frei verfügbar: World Energy Outlook 2008 (<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/weo2008.pdf>)

Für die Kopenhagen Konferenz wurde von der IEA ein pdf-Sonderband veröffentlicht, in dem der Verkehr 2030 ausführlich behandelt wird (http://www.iea.org/weo/docs/weo2009/climate_change_excerpt.pdf).

Ein Energie und CO₂ Datensatz in EXCEL Format wurde unter IEA CO₂ Highlights veröffentlicht (<http://www.iea.org/co2highlights/>).

Im speziellen sollen nun hier die Ergebnisse der IEA Studie *Transport, Energy and CO₂* diskutiert werden:

Die Anzahl der PKW (im englisch light duty vehicles LDV) wird bis ins Jahr 2050 je nach Szenario auf über 2 bis zu 3 Milliarden steigen und im Jahr 2100 die 5 Milliardenengrenzen überschritten haben, wobei die Verkäufe von Neuwagen sich auf 110 Millionen PKW pro Jahr verdoppeln wird.

Beachtlich ist der hochgerechnete Anteil der Wasserstoffbrennstoffzellen und Elektrofahrzeugen, der nach der IEA im Jahr 2050 über 50% betragen soll, während konventionelle Antriebe fast auf Null heruntergehen. Dieses Ziel ist nur durch

fortschreitende Innovation und Investition zu bewerkstelligen.

Für die letztendliche Berechnung der CO₂-Emissionen ist es sehr wichtig, die durchschnittlich gefahrenen Kilometer zu projizieren. Die folgende Tabelle 2 zeigt einige Daten aus dem Jahr 2005. In den USA erkennt man einen zunehmenden Trend, in allen anderen aufgeführten Ländern stagnieren die Verkehrsleistungen oder nehmen langsam ab. LDV umfasst dabei alle Arten PKW sowie Minivans, Sportwagen und SUVs (Sport Utility Vehicle) und haben 7 Sitze oder weniger. An dieser Stelle sei erwähnt, dass in den meisten amerikanischen Studien SUVs zu den Lastkraftwagen gezählt werden. Daher ist in den USA der Anteil der LKW von 21 Prozent im Jahr 1980 auf über 56 im Jahr 2004 gestiegen.

Tabelle 2: durchschnittliche Kilometeranzahl, IEA Transport and CO₂ Seite 123

	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005
Amerika	15.100	14.700	15.300	16.800	18.000	19.000	19.200
Kanada	-	-	18.000	17.800	18.500	18.100	17.300
Japan	-	-	-	10.700	9.900	9.750	9.170
Australien und Neuseeland	-	-	15.760	15.650	14.600	14.410	13.700
Frankreich	-	-	-	13.700	13.850	13.800	13.300
Deutschland	-	-	-	13.400	12.600	12.300	12.000
Italien	-	-	-	11.200	11.500	11.100	11.200
Vereintes Königreich	-	13.800	14.200	16.100	15.900	15.100	13.700
OECD Europa	-	-	-	13.000	12.700	12.400	12.000

In der Studie werden explizite Daten zum Energieverbrauch, CO₂-Emissionen und Treibhausgaseinsparungen aufgeführt. Dazu existieren zwei Grundscenarien mit

zahlreichen Untervarianten:

- 1) Das **High-Baseline-Szenario**: Ein Baseline-Szenario, in dem die heutigen Emissionen angenommen und extrapoliert werden. Im High-baseline Szenario werden keine Einsparungen gültig gemacht und Verbrauch von Energie steigt weiter an, um 20 %.
- 2) Das **Blue-Map-Szenario** ist ein sehr ambitioniertes Modell, welches enormen technologischen und finanziellen Aufwand erfordert. Umweltgesetze werden durchgesetzt und es findet zusätzlich ein Umdenken in der Bevölkerung statt.

Eine Unterstufe des Blue-Map-Szenarios setzt vorwiegend auf die Entwicklung von elektrischen Fahrzeugen und Plug-in-Hybrid und geht davon aus, dass 50 Millionen Fahrzeuge im Jahr 2050 verkauft werden, was in einer erhöhten Stromnachfrage von 3,5 PWh) enden würde.

Die wichtigsten Ergebnisse der IEA-Studie sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Ergebnisse aus IEA Transport and CO₂ 2009 für verschiedene Szenarien

	Basisjahr 2005	Baseline-Szenario 2050	High-Baseline- Szenario 2050
Personenkilometer	40 Billionen	80 Billionen	100 Billionen
Personenfahrzeuge	800 Millionen	2,1 Milliarden	2,6 Milliarden
Ölverbrauch		4.000 Milliarden Liter	6.000 Milliarden Liter
Zurückgelegte Kilometer pro Person	6.000 Kilometer	9.000 Kilometer	12.000 Kilometer
CO ₂ -Emissionen im Transportsektor	7,5 Gigatonnen	14 Gt	18 Gt

Von der IEA sind viele weitere umfassende Datensammlungen online, käuflich oder auf Nachfrage erhältlich. Weitere Tabellen, Diagramme und Berechnungen zu IEA Daten, sowie Daten aus dem *climate change excerpt*, sind auf der Anhang CD unter AMV 1 und 1.1 zu finden.

4.2 World Oil Outlook, OPEC 2009

Quelle: OPEC 2009

(http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/WOO%202009.pdf) und OPEC 2010

(http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/WOO_2010.pdf)

Die OPEC veröffentlicht jedes Jahr ihren World Oil Outlook, geht aber nicht nur auf Ölförderung oder Verbrauch ein. Weitere wichtige Themen sind:

→ Ölpreise

Nachdem der Ölpreis in den letzten Jahren extremen Schwankungen unterworfen war, wird erwartet dass sich der Preis auf einen Bereich zwischen 70 und 100 Dollar pro Barrel stabilisieren wird.

→ Ökonomisches Wachstum

Die OPEC stützt sich auf Aussagen der OECD und erwartet ab diesem Jahr weltweit eine Steigerung des weltweiten BIP. Für China wird ein Wachstum um die 7 % jährlich angenommen, weltweit immerhin 3 %.

→ Weltbevölkerung

Bei einem durchschnittlichen Wachstum von 1 % pro Jahr würden im Jahre 2030 bereits 8,3 Milliarden Menschen auf der Erde leben. Die Einwohnerzahlen in der EU stagnieren, die Russlands gehen zurück und

die der Länder des Mittleren Ostens und Afrika wachsen mit rund 2%.

→ **Urbanisierung**

Über 60 % der Weltbevölkerung wird im Jahr 2030 in Städten leben.

→ **Energiebedarf**

In der Zeitspanne von 2007-2030 wird ein Zuwachs von 42 % im Energiebedarf erwartet. Trotz Anstrengungen und Biokraftstoffgesetzen werden fossile Brennstoffe rund 80% des Weltbedarfes abdecken.

→ **Alternative Kraftstoffe**

Alternative Energielieferanten und Kraftstoffe werden einen Marktanteil von 3,4 % haben und einem Fördervolumen von 151 Millionen Tonnen Öläquivalente (vgl. OPEC: *WEO 2009*, S.59)

Die OPEC benutzt zur Modellierung das **Referenzszenario**, den sogenannten *reference case*, mit folgenden Annahmen: die Wirtschaft erholt sich langsam; das Wachstum ist jedoch ungewiss; in naher Zukunft gibt es aber stärkeres Wachstum und weniger Produktion. Das Referenzszenario wurde am intensivsten behandelt und erscheint am sinnvollsten für die weitere Verwendung. Es wurde um zwei Umweltschutzprogramme erweitert: zum einen das der amerikanischen Umweltbehörde und zum andern das der Europäischen Union, das sogenannte 20-20-20-Paket.

Im **Rezessionsszenario** hingegen werden pessimistischer Annahmen für die Zukunft angenommen; vor allem die Daten zum Wirtschaftswachstum werden nach unten korrigiert.

Im **Higher-Growth-Szenario** sieht sich die Welt in einen wirtschaftlichen Boom und das Wachstum liegt durchschnittlich 0,5 % über dem des Referenzszenarios.

Tabelle 4: Fahrzeugübersicht nach OPEC, World Oil Outlook 2009, Seite 85

Quelle:

http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/WOO%202009.pdf oder Anhang CD: AMV 2, OPEC Transport and Oil und Tabelle 2, OPEC.

	Anzahl PKW pro 1.000 Einwohner				PKW in Millionen				Wachstumsrate
	2007	2010	2020	2030	2007	2010	2020	2030	2007-2030
Amerika	575	557	584	603	259	259	295	325	1,0
Westeuropa	440	436	463	489	238	238	260	277	0,7
OECD Pazifik	424	427	442	449	85	86	89	88	0,2
OECD	488	481	508	530	582	583	644	691	0,7
Südasien	11	14	32	69	17	23	60	143	9,6
Südostasien	44	48	67	91	27	31	48	71	4,2
China	20	26	62	115	26	36	89	167	8,4
OPEC	51	56	73	95	19	23	35	52	4,4
Welt	120	121	139	165	802	840	1070	1372	2,4

Die niedrigste Rate weisen dabei Bangladesch und Äthiopien mit einem PKW pro 1.000 Einwohner, während Länder wie die USA oder Deutschland schon ihr Sättigungsniveau mit rund 600 PKW erreicht haben. Unter den Entwicklungsländern wie China und Südasien sind die Zuwachsraten sehr hoch; daher wird sich der Bestand innerhalb von wenigen Jahren verdoppeln, wobei auch die Nutzfahrzeuge in den kommenden Jahren um 80% zunehmen werden.

Die ökologischen Folgen einer Vollmotorisierung dieser Ländern wären fatal: allein im Falle Chinas würde eine Vollmotorisierung der Bevölkerung einen verdoppelten des heutigen weltweiten Ölbedarfs entsprechen. Das bedeutet, dass China künftig ein Ölverbrauch prognostiziert wird, der auf einem Niveau mit dem der gesamten Welt von heute liegt.

Die technische Innovation spiegelt sich in der Entwicklung des spezifischen Ölverbrauches pro Fahrzeug wieder. Die größte Abnahme wird in China mit 3,4 % pro Jahr angenommen, weltweit ist es durchschnittlich -1,6% (vgl. OPEC: *WEO 2009*, S.106) Weitere wichtige und themenrelevante Ergebnisse aus der OPEC Studie sind in Tabelle 5 dargestellt. Die Hochrechnungen wurden jeweils mit dem Referenzszenario durchgerechnet.

Tabelle 5: wichtige Ergebnisse aus OPEC World Oil Outlook WOO 2009 (in Klammern Werte des WOO 2010, siehe AMV 1)

Jahr	2007	2030
Energiebedarf [Millionen Tonnen Öläquivalente]	11.109	15.804 (16.145)
Weltweite Ölnachfrage [Millionen Barrel pro Tag]	84,6	105,6 (97,6)
Weltweite Ölnachfrage im Verkehrssektor [Millionen Barrel pro Tag]	33,5	41,2 (41,8)
Anzahl PKW [Millionen]	800	1.372 (1.452)
Anzahl Nutzfahrzeuge [Millionen]	178	352 (390)
Pro Kopf Verbrauch Amerika [Barrel]	26	15,2
Pro Kopf Verbrauch China [Barrel]	2	3,9

Im OPEC-Bericht werden aber wenig Anreize gegeben, Energie zu sparen, den Ölverbrauch zu reduzieren oder auf alternative Kraftstoffe zu bauen, sondern es wird empfohlen beispielsweise die Forschung von Carbon Capture and Storageprogrammen (CCS) zu fördern. Denn die OPEC vertritt Öl fördernde Länder wie die Vereinigten Arabischen Emirate, Saudi Arabien, Libyen oder Katar, die daran interessiert sind, ihr Öl zu verkaufen. Daher gilt es, den OPEC-Bericht kritisch zu betrachten, da er nicht unfrei von Einflüssen der Öl-Lobby zu sein scheint.

4.3 Income's effect on car and vehicle ownership worldwide 1960-2030 von Dargay und Gately

(Quellen:

<http://econ.as.nyu.edu/docs/IO/9382/RR97-33.PDF>

http://www.econ.nyu.edu/dept/courses/gately/DGS_Vehicle%20Ownership_2007.pdf

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, existierend Studien miteinander zu vergleichen und eigene Aussagen über den PKW-Bestand und die daran gekoppelten Treibhausgasemissionen für das Jahr 2030 zu treffen. Dafür grundlegende Literatur sind zwei Studien von Dargay, Gately und Sommer aus den Jahren 1997 und 2007 mit dem Titel „Income's effect on car and vehicle ownership“.

In den Studien untersuchen die Autoren, wie sich die sogenannte „car ownership“ in den kommenden Jahren verhalten wird. Dies bezeichnet die Anzahl von Fahrzeugen, also PKW und Nutzfahrzeuge, pro 1000 Einwohner. Die Studie errechnet mithilfe einer Sättigungsgrenze den Fahrzeugbestand für 2015; in der Neuauflage werden die Aussagen bis zum Jahr 2030 erweitert.

In der ersten Studie wurde eine feste Sättigungsgrenze für alle Länder mit 852 Fahrzeugen/1.000 angenommen (vgl. Dargay et al.: *Income's effect on vehicle ownership*, S.14), in der überarbeiteten Version wurden die Grenzen den jeweiligen Ländern angepasst. Denn eine Grenze von 852 Fahrzeugen/1.000 ist für Länder wie China oder Bangladesch utopisch und völlig überzogen. Die nationalen Unterschiede sind teilweise sehr drastisch: während die USA im Jahre 1992 mit 562 Autos pro 1.000 Einwohner schon fast den Sättigungswert erreicht hat, befinden sich Länder wie China oder Indien bei 2 Fahrzeugen pro 1000 Einwohner. Für China wird für das Jahr 2030 ein Motorisierungsgrad von 269 Fahrzeugen angenommen; dies entspricht ungefähr den japanischen Verhältnissen von 1970. In dieser Studie wurden auch verschiedene Untersuchungen bezüglich der Wachstumsraten im Motorisierungsgrad miteinander verglichen.

Dargey und Gately testen mehrere Wachstumsfunktionen, um die Entwicklungen optimal darstellen zu können. Es musste eine Funktion gefunden werden, die S-förmig

verläuft und bei einem bestimmten Wert Sättigung erreicht. Die Lösung dazu war die Gompertz-Funktion, eine doppelte Exponentialfunktion:

$$V_t^* = Y^* \exp(\alpha \cdot \exp(\beta \cdot \text{GDP})) \quad (9)$$

Dabei ist γ das Sättigungsmaximum, α und β sind länderspezifische Faktoren, die der Kurve ihre Form geben. Das GDP wird angegeben in US-Dollar/Kopf und ist auf das Jahr 1995 bezogen.

Die durch die Studie gegebenen Faktoren können aber nicht direkt in Gleichung (9) eingesetzt werden, da die zukünftigen Autobesitzer nicht sofort auf ihre Einkommenserhöhung reagieren, sondern zeitverzögert. Dies wird durch eine Modifikation berücksichtigt, die in Gleichung (10) dargestellt ist:

$$V_t = V_{t-1} + \theta \cdot (V_t^* - V_{t-1}) \quad (10)$$

Der Faktor θ wird für alle Länder mit 0,09 angegeben. Damit wird das Gesamtfahrzeugverhältnis berechnet. Man muss teilweise mit einer zeitlichen Verzögerung (*longterm adjustment*) von zwanzig bis 25 Jahren rechnen.

Es besteht kein linearer Zusammenhang zwischen steigendem Bruttoinlandsprodukt und steigender PKW-Anzahl, in Niedriglohnländern steigt die Fahrzeuganzahl sehr langsam bei Mehreinnahmen durch die Bevölkerung. Erst bei einem Pro-Kopf-BIP von 3.000 bis 10.000 US Dollar steigt der Quotient, bis er in Industrieländern die Sättigungsgrenzen erreicht hat.

Eine Fahrzeuganschaffung ist auch immer eine Frage der Mentalität und der Politik eines Landes: während Amerikaner sich das benötigte Geld für einen Autokauf eher über Kreditinstitut leihen und es kaum Einschränkungen beim Fahrzeugwerb von Seiten der Politik gibt, muss man in Singapur an einer Art Verlosung teilnehmen, um überhaupt eine der begehrten Fahrerlaubnisse zu ergattern (vgl. Sperling/Gordon: *2 Billionen Cars*, S. 154).

Eine Kombination aus (9) und 10 ergibt dann folgende Gleichung:

$$V_t = Y\theta \cdot \exp(\alpha(\exp\beta \cdot \text{GDP})) + (1-\theta)V_{t-1} \quad (11)$$

Benutzt wurden dazu Datensätze aus den Jahren 1960-1992. Faktoren wie Demographie, Preisstruktur, Urbanisierung (hohe Urbanisierung führt zu weniger Fahrzeugen da der Anteil an öffentlichen Verkehrsmitteln steigt) oder Geographie werden von den Autoren allerdings nicht berücksichtigt.

Faktor α beschreibt die Elastizität des Einkommens und wird für alle beschriebenen Länder auf 5,9 angesetzt. Hingegen variiert β zwischen 0,09 und 0,3: je geringer β , desto geringer fällt das Verhältnis Auto/Einwohner aus. Maximale Sättigung wird in der ursprünglichen Arbeit für alle Länder bei 0,85 angenommen, wobei das Pro Kopfeinkommen dabei sehr variabel ist.

Die Anzahl an Autos in den OECD-Ländern soll bis 2015 um 48% steigen und dann einen weltweiten Anteil von 80 % ausmachen. Die großen 6 nicht-OECD Länder (China, Indien, Pakistan, Taiwan, und damals noch Südkorea und Israel) werden ihre Flotte um 760% steigern (vgl. Dargay et al. *Income's effect on vehicle ownership*, S.19)

Dabei werden Ländern mit hohem Einkommen wie Taiwan oder Südkorea die größten Zuwachsraten zugesprochen, aber auch Entwicklungsländer mit steigendem Wirtschaftswachstum wie China oder Indien werden ihre Flotte teils dramatisch vergrößern: Nur die USA und Japan sollen im Jahr 2015 noch mehr Fahrzeuge als China besitzen. Für China wird weiter eine Exponentialanstieg von 11%/Jahr angenommen, basierend auf einem heutigen Anteil von 35/1.000 bei einer Einwohnerzahl von 1,4 Milliarden, entsprechend einem Wert von 50 Millionen Fahrzeugen, und einem Einkommen von 5.400 US\$. Für die USA wird eine relativ baldige Sättigung vorausgesagt; aufgrund des Populationszuwachses wird der Fahrzeugbestand aber jährlich weiterhin um 1,4 % zunehmen.

In der neuen Version mit Martin Sommer von 2007 wird nochmals auf die außergewöhnliche Rolle des Verkehrs hingewiesen. Zudem werden die Sättigungsniveaus neu berechnet als Funktion der Bevölkerungsdichte und Agglomeration, die Prognosen für das Jahr 2030 ausgedehnt und die Berechnungen für weitere 45 Ländern durchgeführt.

Es wird weiter vorausgesagt, dass der weltweite Bestand an Kraftfahrzeugen von 800

Millionen im Jahr 2002 auf etwa 2,1 Milliarden in 2030 ansteigen wird (vgl. Dargay und Sommer: *Vehicle ownership and Income growth*, S.26). In der gleichen Zeit wird China seinen Anteil um den Faktor 20 von 20 Millionen auf 390 Millionen erhöhen. Wenn China einen Motorisierungsgrad wie die USA erreichen würde, dann verbräuchte das Land rund 90 Millionen Barrel Öl am Tag, weit aus mehr als der heutige weltweite Verbrauch mit rund 80 Millionen Barrel (vgl. Spiegel Special: *Neue Energien*, S. 152).

Die USA und Frankreich haben beispielsweise die gleichen Sättigungsniveaus bei sehr unterschiedlichen Einkommensstrukturen. In Frankreich ist zur Sättigung ein höheres Einkommen notwendig als in den USA, weil die Unterhaltungs-, Wartungs-, und Anschaffungskosten in Frankreich höher sind.

In den OECD Ländern wird das Wachstum bis 2030 nur um 0,6 % jährlich zunehmen, weil in den meisten Ländern bereits fast Sättigung erreicht ist. Für Nicht-OECD-Länder liegt die Rate für PKW schon bei 3,5 %, wobei China mit 10,6 % die höchste Rate hat, gefolgt von Indien mit 7% und Indonesien mit 6%. Der Anteil der Nicht-OECD-Länder an allen Fahrzeugen wird in 20 Jahren 50 % übersteigen, wobei schon 30 % an China fallen (vgl. Dargay und Sommer: *Vehicle ownership and income growth*, S.5)

Ausführliche Exceltabellen sind im Anhang unter Modellierung Verkehr zu finden, im speziellen die Dateien AMV 3, Dargay und Gately.

4.4 GAINS Report, 2010,

(Quelle: <http://gains.iiasa.ac.at/gains>)

Das IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) ist ein 1972 gegründetes internationales Forschungsinstitut mit Schwerpunkt auf politisch orientierten Umwelt,- Energie,- und Populationsuntersuchungen. Die IIASA hat die Daten zum GAINS (Greenhouse Gas Air Pollution Interactions and Synergies) Report zur Verfügung gestellt, der den Fokus auf den zukünftigen Energieverbrauch, die Verkehrsleistung und das weltweite Fahrzeugaufkommen legt, aber auch auf

Emissionen aus der Landwirtschaft und Gebäuden.

In den Datensätzen wird die Fahrzeugflotte in kleinere Gruppen eingeteilt, zum Beispiel Motorräder mit zwei oder vier Takt Motoren, PKW und kleinere Busse, LKW Busse und sogenannter „off-road-transport“-Fahrzeuge, unter anderem Motorboote, Schneemobile, Traktoren, landwirtschaftliche Fahrzeuge und Bagger. Diese werden wiederum einzeln in ihre Antriebsarten wie Verbrennungsmotor, Elektromotor, Brennstoffzelle oder Autogas unterteilt.

Im GAINS-Bericht werden Daten bis 2030 analysiert, basierend auf dem IEA Baseline Szenario aus dem World Energy Outlook 2009. Das Modell wird anhand der Daten aus den Jahren 2000 und 2005 kalibriert. Dadurch ergibt sich ein sehr konkretes Bild mit einer hohen globalen Auflösung.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse für Australien, USA, Deutschland, Frankreich, Japan, Indien, China und Großbritannien für die Jahre 2000 bis 2030 zusammengefasst. Bei den PKW bilden Elektroautos, Ottomotoren, Gasantriebe, Flüssiggas und Zwischendestillate, wie zum Beispiel Diesel, eine Gruppe. Für Nutzfahrzeuge werden Busse und Trucks mit den vorher beschriebenen Antrieben unterschieden.

In den Industrieländern ist ein abnehmender Trend oder eine Stagnation zu erkennen; bei rückläufiger Bevölkerungsentwicklung bedeutet dies dennoch eine Erhöhung der persönlichen Mobilität. Dieser Effekt ist aber gerade in Indien und China umgekehrt, denn dort werden die Fahrzeugbestände zunehmen, sowie auch die Bevölkerungsdichte. In China und Indien ist eine regelrechte Explosion zu erkennen. Daher ist in den sogenannten Schwellenländern in den kommenden Jahren mit einem enormen Zuwachs an Energiebedarf im Transport zu rechnen. Interessant ist auch die Entwicklung der Motorräder in Indien nach GAINS: Es sollen im Jahr 2030 über eine Milliarde Motorräder auf indischen Straßen unterwegs sein; dies würde einem Anstieg um den Faktor 12 gegenüber 1990 bedeuten. Nach GAINS werden die Annex-1 Ländern sowie Indien und China im Jahr 2030 über 900 Millionen Fahrzeuge besitzen und zudem 300 Millionen Nutzfahrzeuge (siehe auch Anhang CD, Modellierung Tabelle 3 bis 5).

Tabelle 6: Ergebnisse der GAINS Studie zur PKW-Entwicklung in ausgewählten Ländern, Angabe in Tausend

PKW	2000	2010	2020	2030
Australien	2.773	2.943	3.160	3.094
China	8.065	31.872	128.387	316.539
Deutschland	45.820	44.902	45.800	49.538
Frankreich	29.212	28.491	31.396	28067,81
Indien	5.667	5.514	10.866	21.522
Japan	52.257	55.377	53.184	51.078
UK	22.758	24.804	25.687	25.150
USA	133.620	139.332	161.012	187.804

In Tabelle 7 werden die Ergebnisse der GAINS Studie für die Entwicklung von Nutzfahrzeugen für dieselben ausgewählten Länder präsentiert. Die Ergebnisse sind mit denen der PKW kohärent. Während die Industrieländer in den nächsten zwanzig Jahren ihre Flotte im Beispiel von Japan fast halbieren, werden 2030 fast 5-mal soviel chinesische Laster unterwegs sein wie im Jahr 2000. Auch aus diesen Aspekten heraus wäre eine Verlagerung des Ferntransportes von der Straße auf die Schiene erstrebenswert. Indien und China besitzen eines des größten Eisenbahnnetzes der Welt. Durch Ausbau, Renovierung, höhere Auslastung und bessere Infrastruktur ließe sich einiges an Verkehrsaufkommen verlagern.

Tabelle 7: Ergebnisse der GAINS-Studie zur NFZ-Entwicklung für ausgewählte Länder, Abgabe in Tausend

NFZ	2000	2010	2020	2030
Australien	806	839	751	769
China	13.148	21.674	39.472	62.266
Deutschland	3.015	2.875	2.875	2.875
Frankreich	6.842	8.110	9.981	10.805
Indien	2.628	2.031	3.536	6.614
Japan	17.905	16.128	15.399	14.706
UK	3.110	4.070	3.719	3.570
USA	87.801	102.585	117.250	136.308

In der folgenden Abbildung 11 werden die Ergebnisse für China, Indien und Deutschland graphisch miteinander verglichen. Deutschland steht stellvertretend für ein hochentwickeltes Industrieland mit rückläufigen Verkehrsaufkommen.

Daten zur Abbildung 11 sind unter Abbildung 1 im Anhang zu finden.

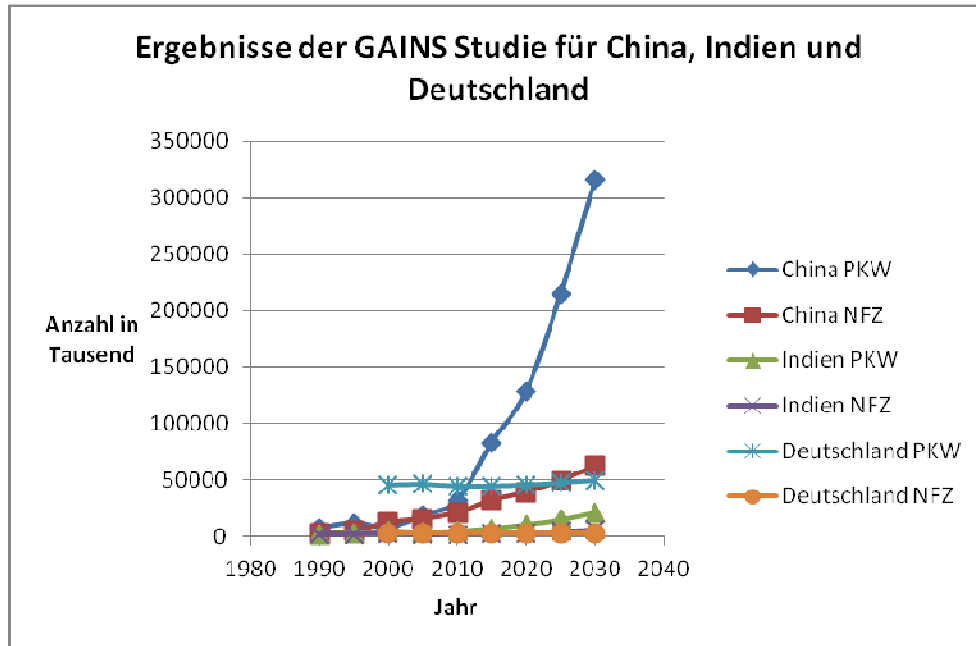


Abbildung 11: GAINS-Ergebnisse für China, Indien und Deutschland, GAINS Report 2010, <http://gains.iiasa.ac.at/index.php/home-page>

Es ist zu erkennen dass, die deutschen NFZ sowie PKW auf einem konstanten Niveau bleiben. Der PKW-Bestand in Indien wird in den nächsten zwanzig Jahren leicht zunehmen, der Bestand an NFZ hingegen kaum. China hingegen verzeichnet hohe Zuwächse in PKW sowie in NFZ. Nach der GAINS-Studie steigt die Anzahl der PKW von 31,8 Millionen in 2010 auf 316,5 Millionen im Jahr 2030 an.

In dieser Arbeit soll auch die Klimawirkung von CO₂-Emissionen bewertet werden. GAINS liefert auch Daten zum Energieverbrauch, diese wurden umgerechnet, beispielsweise in Energieverbrauch pro Fahrzeug. Durch Emissionsfaktoren (siehe Glossar) wurden spezifische CO₂-Emissionen pro Fahrzeug berechnet. Tabelle 8 dient dazu, Energieverbräuche und errechnete CO₂-Ausstöße pro Fahrzeug darzustellen. Die Ergebnisse sind für drei Länder: die USA, Deutschland und China angegeben. In allen Ländern ist ein Zuwachs an Fahrzeugen zu erkennen. In Deutschland und Amerika nimmt der Energieverbrauch in den nächsten Jahren ab, in China hingegen drastisch zu, wobei der spezifische Energieverbrauch pro Fahrzeuge durch verbesserte Technologien und reduzierten Spritbedarf sinken wird. Das erhöhte Fahrzeugaufkommen in China führt zudem zu einer Zunahme der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen.

**Tabelle 8: Übersicht von Ergebnissen der GAINS-Studie für USA, Deutschland und China;
Englische Punktation: Punkt entspricht dem deutschen Komma**

(siehe auch Tabelle 3 im Anhang Tabellen)

Alle Angaben bezogen auf ein Jahr	Deutschland	USA	China
Anzahl PKW im Jahr 2000 [in Tausend]	45.820	133.620	7.681
Anzahl PKW im Jahr 2030 [in Tausend]	49.537	187.804	316.539
Energieverbrauch im Jahr 2000 [PJ]	1.669	9.090	238
Energieverbrauch im Jahr 2030 [PJ]	1.468	8.417	6.580
Energie pro Fahrzeug 2000 [GJ]	36.4	68.0	31.0
Energie pro Fahrzeug 2030 [PJ]	29.6	44.8	20.8
CO ₂ -Emissionen 2000 [Mt]	154	854	22,4
CO ₂ -Emissionen 2030 [Mt]	133	790	595
CO ₂ -Emissionen pro Fahrzeug 2000 [t]	3.4	6.4	2.9
CO ₂ -Emissionen pro Fahrzeug 2030 [t]	2.7	4.2	1.9

4.5 QUANTIFY Intergrated Project 2005-2010

(Quelle: <http://www.pa.op.dlr.de/quantify/>)

Das QUANTIFY-Projekt wird von der europäischen Kommission finanziert und steht unter der Anleitung des deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit weiteren 45 europäischen Partnern. Hier besteht besonderes Interesse an den Emissionen von Treibhausgasen (CO_2 , CH_4 , NO_x , VOC) aus allen Verkehrssektoren. Daher lassen sich nicht nur klimaspezifische Daten darstellen, sondern auch Informationen zur Luftqualität und den umweltmedizinischen Aspekten bei längerfristiger Belastung ableiten.

Die QUANTIFY-Daten sind vom Jahr 2000 bis ins Jahr 2100 in fünf verschiedenen SRES Szenarien (A1, A2, B1, B2 und A1 High) verfügbar. Sie haben eine globale Auflösung von einem Grad.

Es sollen Daten erhoben werden die den Einfluss des europäischen Verkehrs auf das Klimasystem beschreiben. Diese werden auf die Zukunft integriert.

In Abbildung 12 werden die aus dem Straßenverkehr stammenden CO_2 -Emissionen in Megatonnen gegen die Zeit aufgetragen. In allen Rechnungen gipfelt der Ausstoß im Jahr 2050 und fällt danach ab. Nach dem A1B-Szenario steigen die CO_2 -Emissionen auf über 11.000 Mt an. Dies entspricht 35 % der globalen Emissionen im Jahr 2007. Den drei anderen Szenarien zufolge werden die Emissionen die 8.000 Mt-Grenzen nicht überschreiten, dennoch ist eine Steigerung von über 50% gegenüber 2007 zu erwarten.

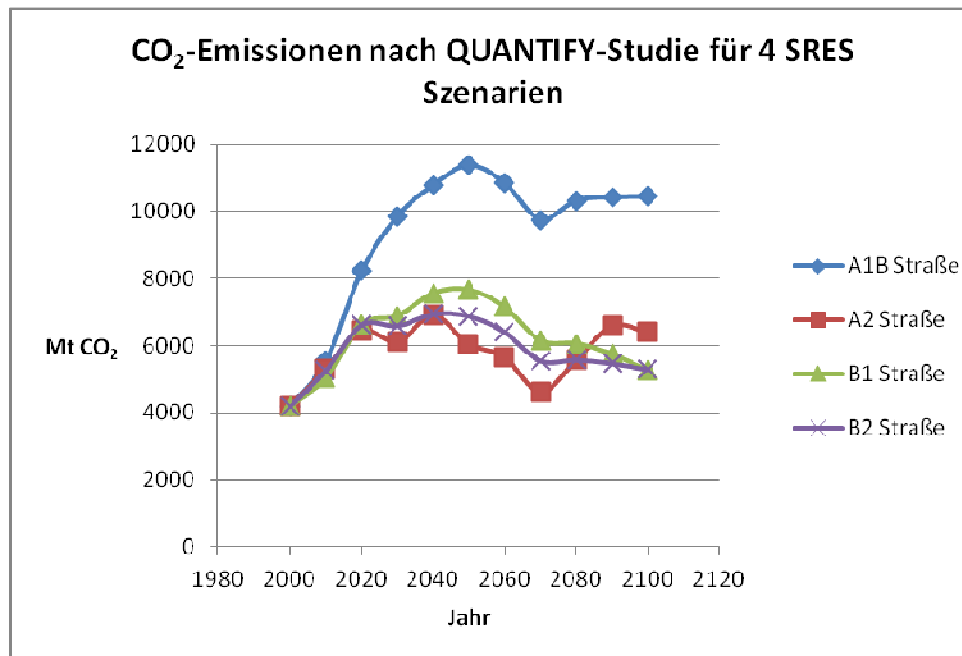


Abbildung 12: CO₂-Emissionen im Straßenverkehr für SRES Szenarien

Die zwei folgenden Grafiken stellen einerseits die Entwicklung aller Verkehrssektoren nach dem A1B-Szenario da, andererseits nach dem B1 Szenario. Es ist deutlich zu erkennen, dass der internationale Flug- und Schiffsverkehr in Zukunft weiter ansteigen wird. Der Schienentransport wird kaum Anteil an den globalen Emissionen haben und auch der nationale Schiffsverkehr schlägt kaum zur Buche (Die Datensätze zu den Abbildungen sind unter Abbildung 2 QUANTIFY im Anhang angegeben und weitere Berechnungen sind unter AMV 4 bis 7 zu finden).

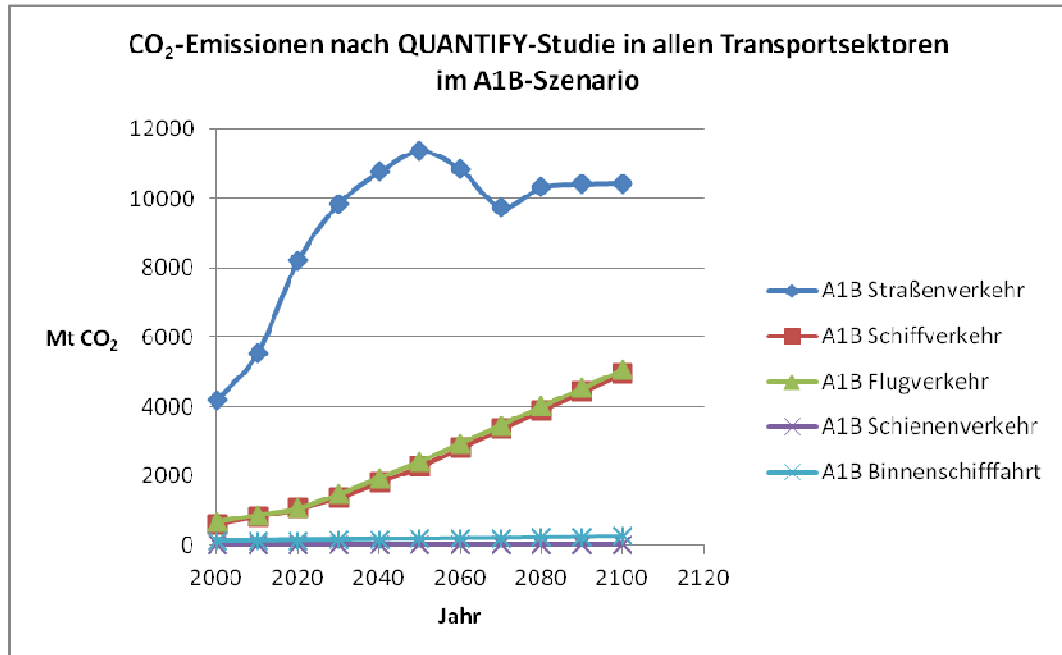


Abbildung 13: CO₂-Emissionen in verschiedenen Sektoren nach A1B-Szenario

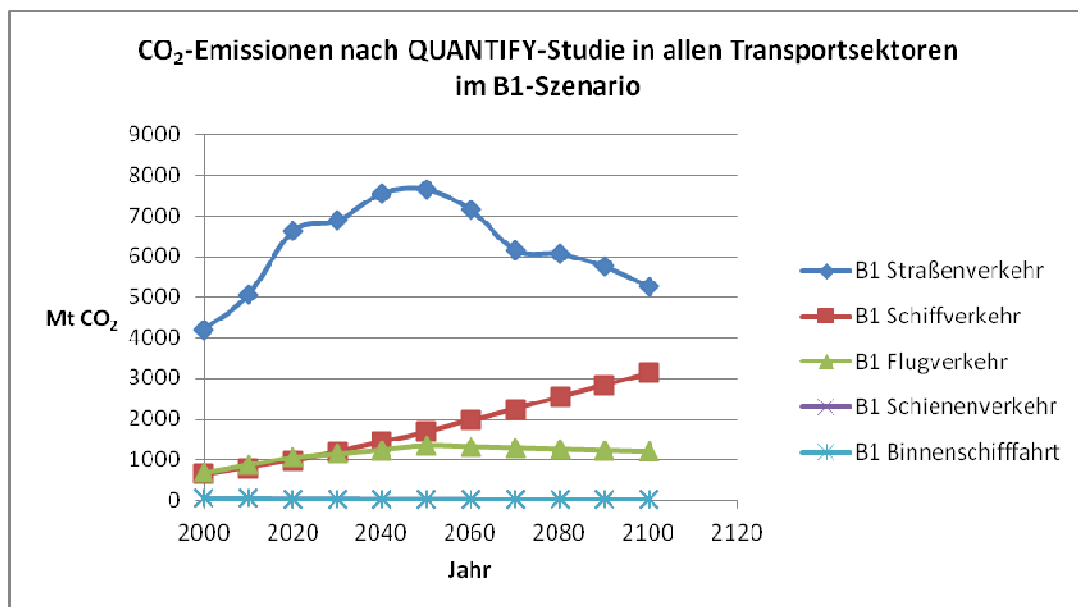


Abbildung 14: CO₂-Emissionen in verschiedenen Sektoren nach B1-Szenario

Im Ökoszenario B1 wird ab 2050 im Gegensatz zum A1B Szenario sowohl für den Straßenverkehr wie für den Flugverkehr mit einer Stabilisierung oder gar mit einer Reduktion der globalen Emissionen gerechnet. Die Gründe hierfür sind nicht ganz lückenlos nachzuvollziehen, ganz sicher steht für den unter Druck geratenen Straßenverkehr der verstärkte Übergang zu Elektrofahrzeugen sowie eine generelle

Effizienzverbesserung im Vordergrund; für den Flugverkehr ist ein Übergang zu erneuerbaren Biotreibstoffen wahrscheinlich. Der Schiffsverkehr zeigt sich von der Entwicklung unbeeindruckt, nimmt stetig zu und soll im Jahr 2100 über 3.000 Mt betragen.

In Tabelle 9 werden weitere Ergebnisse der QUANTIFY Studie zur CO₂-Emission von anderen Transportsektoren zusammengefasst.

Tabelle 9: QUANTIFY-Ergebnisse für A1B, B1, A2 und B2

(siehe Anhang AMV 6 QUANTIFY Szenarienvergleich)

Alle Angaben in Tg	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2080	2100
A1B-Schifffahrt	626	845	1.064	1.393	1.832	2.271	3.890	4.969
A2-Schifffahrt	626	726	825	962	1.135	1.308	2.251	2.880
B1-Schifffahrt	626	801	976	1184	1.427	1.669	2.538	3.117
B2-Schifffahrt	626	782	937	1.111	1.302	1.493	2.271	2.790
A1B-Flugverkehr	677	869	1.062	1.474	1.946	2.418	4.007	5.067
A2-Flugverkehr	675	868	1.062	1.197	1.339	1.481	2.403	3.018
B1-Flugverkehr	675	868	1.062	1.146	1.245	1.345	1.261	1.205
B2-Flugverkehr	675	868	1.062	1.147	1.260	1.373	1.619	1.783
A1B-Schienenverkehr	123	135	147	161	179	196	235	261
A2-Schienenverkehr	123	143	164	190	222	253	347	409
B1-Schienenverkehr	123	116	109	103	98	93	70	54
B2-Schienenverkehr	123	121	118	112	102	92	79	70
A1B-Straßenverkehr	4.200	5.555	8.230	9.860	10.768	11.376	10.850	9.758
A2-Straßenverkehr	4.200	5.313	6.448	6.120	6.898	6.050	5.661	4.622

B1- Straßenverkehr	4.200	5.054	6.631	6.884	7.560	7.657	7.148	6.157
B2- Straßenverkehr	4.200	5.271	6.622	6.589	6.941	6.882	6.406	5.550

Anhand obiger Daten lässt sich klar erkennen, dass alle Transportsektoren ihren Anteil an den weltweiten Emissionen von CO₂ erhöhen werden. Der Straßenverkehr wird aber auch in Zukunft den größten Teil ausmachen, wobei nach QUANTIFY ist die Spitze Mitte dieses Jahrtausends zu erwarten ist. Danach werden die Emissionen abnehmen bzw. stagnieren. Je nach Szenario liegen die Steigerungen der Schadstoffemissionen innerhalb der nächsten 90 Jahre bei bis zu 800 % (vgl. Schifffahrt im A1-B Szenario). Eine Projektion bis ins Jahr 2100 erscheint einerseits konsequent, die Fehlerbreiten nehmen aber immer weiter zu, je weiter man in die Zukunft extrapoliert. Es bestehen aber kaum Zweifel daran, dass Schiff- und Flugverkehr ihre Emissionen erhöhen werden, sofern das Wachstum weiterbesteht. Denn in diesen Sektoren sind die Verwendungen von alternativen Antrieben beschränkt, ein reines elektrisches Passagierflugzeug ist technisch nicht denkbar.

4.6 International Transport Forum, OECD, 2008

(Quelle: <http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/10Outlook.pdf>)
<http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/10GHGTrends.pdf>

Das internationale Transportforum steht unter der Anleitung der OECD und wurde gegründet von den Verkehrsministern von 50 Ländern. Es soll der Kommunikation, der Umsetzung von Richtlinien und dem Schutz von Mensch und Natur dienen. Die OECD orientiert sich mit ihrer Studie an den Ergebnissen der IEA, zudem werden eigene Konzepte und Ideen vorgeschlagen.

In den GHG Trends wird eine sehr gute Übersicht über den Verkehr in fast allen wichtigen Ländern von 1990 bis 2007 gegeben, so z. B. China im Jahr 2007 mit einer Bevölkerung von 1.327 Millionen, mit einem Gesamt-CO₂-Ausstoß von 6.147 Mt CO₂,

mit einem Anteil des Verkehrs von 487 Mio. Tonnen

Die Kosten für eine CO₂-Reduktion auf 120 g/km werden auf 34 bis 71 Euro pro Tonne angegeben (vgl. OECD: *Cutting CO₂ Emissions*, S.11), beachtet werden hierbei technische Errungenschaften und der Einsatz von leichteren Werkstoffen. Die OECD fordert, dass wichtige Autoteile wie Reifen, Klimaanlage oder Scheinwerfer auf ihre Effizienz getestet und in Kategorien eingeteilt werden, damit der Kunde sieht, mit welchen Komponenten sein Fahrzeug ausgestattet ist. Ferner Fahrzeughersteller sollen motiviert werden, ihre CO₂-Emission zu senken. Momentan besteht eine freiwillige Selbstverpflichtung zur Reduktion, die allerdings bisher wenig Effekt hatte. Zudem erscheint es sinnvoll, entweder steuerliche Vorteile gegenüber umweltfreundlichen Fahrzeugen einzurichten oder Sanktionen gegen „Klimakiller“ zu erheben.

Die OECD-Studie besagt, dass die Anzahl der Personenkilometern, aufgrund steigenden Fahraufkommens in den Entwicklung,- und Übergangsländern stetig steigen wird. Die OECD sagt eine Fahrleistung der PKW von 25.000 Milliarden Kilometern voraus und 20.000 Milliarden tkm für den Transport von Fracht. Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch soll dabei aber sinken, bzw. die Fahrleistung pro Liter Sprit steigen. Weiter wird die wichtige Rolle und die Verantwortung des individuellen Verkehrs unterstrichen, und die Steigerung der Flexibilisierung durch moderne Fortbewegungsmittel beschrieben: In Industrienation steigt der Mensch von Bus und Bahn auf Auto und Flugzeug um, in Entwicklungsländern von Fuß und Fahrrad auf Moped und Bus .Es ist ein klarer Trend zu entdecken ,dass bei steigender Urbanisierung und weniger Beschäftigung der Anteil der zu Fuß oder Rad zurückgelegten Kilometer ansteigt. International führend ist Amsterdam mit über 50 %, gefolgt von Bilbao, Valencia und Hong Kong. In Melbourne hingegen entfallen über 70 % der geleisteten Kilometer auf PKWs und in Warschau hat der ÖPNV einen Anteil von 50% (vgl. OECD-Studie: *Greenhouse gas reduction strategies in the transport sector* 62).

Im Fall Chinas wird in dieser Studie noch eine extra Unterteilung beachtet: Im Referenzfall, dass sich Politik und Wirtschaft wie bisher weiter entwickeln, steigt der Wohlstand und damit auch der Fahrzeugbestand und der Energieverbrauch. Im „china-low“-Szenario (vgl. OECD: *Transportation outlook*, S.18) hingegen fassen politische

Maßnahmen Fuß, die das wirtschaftliche Wachstum schwächen. Daher ist es nicht so stark wie bisher angenommen, was zur Folge hat, dass auch die Fahrzeugzahl nur mit der halben Geschwindigkeit anwächst.

4.7 International Energy Outlook 2010, U.S Energy Information administration, US Department of Energy

(Quelle: [http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/pdf/0383\(2010\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/pdf/0383(2010).pdf))

Diese EIA-Studie analysiert unter anderem den Energieverbrauch, die Wirtschaftsaktivitäten und den gekoppelten Treibhausgasausstoß bis zum Jahr 2035. Untersucht wird dabei ein *Business-as-Usual*-Szenario und verschiedene Variationen bezüglich Wirtschaftswachstum und Ölpreise. Der weltweite Verbrauch von Energie wird nach dem Referenzszenario von 2007 mit 520 Exajoule bis 2035 um 47% steigen auf 776 EJ.

Vor allem in Nicht-OECD-Länder und asiatischen Ländern wird sich der Verbrauch innerhalb der nächsten 30 Jahre verdoppeln. Über 80 % des weltweiten Bedarfs werden durch fossile Brennstoffe abgedeckt und besonders China wird seine Kohleförderung um 78% steigern. Während die OPEC eine längerfristige Preisstabilisierung von Öl erwartet, steigt der Preis im EIA-Report auf 133 \$ pro Barrel. Der Transportsektor wird seinen Anteil bis zum Jahr 2035 am Gesamten von 27 % jährlich um 1,3 % steigern. Der Gesamtverbrauch an flüssigen Treibstoffen (auch GTL und CtL) wird auf rund 111 Millionen Barrel pro Tag ansteigen, konventionelle Flüssigkeiten haben weiterhin einen Bärenanteil von 88 %, davon fließen 61 % in die Beförderung von Menschen und Waren (vgl. EIA: *International Energy Outlook*, S.25). Nach einer Schätzung des *Oil and Gas-Journals* liegen die weltweiten Vorräte an Erdöl bei 1,3 Milliarden Barrel.

Folgende Aussagen werden für spezielle Länder und Staatengemeinschaften formuliert:

1.) Nordamerika

Nach einer Vorgabe des *Energy Independence and Security Acts* darf der Spritverbrauch eines PKW unterhalb von 35,6 Meilen pro Gallone (nicht über 6,6 l/100km) liegen.

2.) OECD Europa

Durch rückläufige Einwohnerzahlen und strenge Umweltrichtlinien nimmt der Energieverbrauch im Verkehr in Europa jährlich um 0,7 % ab.

3.) OECD Asien

Die Weltwirtschaftskrise hat die asiatische Region schwer getroffen, im gesamten Raum wird eine Abnahme des Energieverbrauches von 0,4 % angenommen, nur in Südkorea fällt das Wachstum mit 1,3 % relativ stark aus.

4.) China

Das Reich der Mitte wird in allen Belangen weiter wachsen, das BIP wächst um 5,8 %, der Energieverbrauch steigt um 4,3 % pro Jahr und auch die Bevölkerung noch mit 1 % jährlich. Es wird aber angenommen dass der Motorisierungsgrad von China im internationalen Vergleich immer noch relativ gering ist.

Die energiebedingten CO₂-Emissionen werden von 29,7 Milliarden Tonnen auf über 42 Milliarden Tonnen in 2035 steigen, die Nicht-OECD-Länder werden ihren Anteil auf die Hälfte des Gesamtverbrauchs erhöhen (vgl. EIA: *International Energy Outlook*, S.17). Der pro-Kopf-Ausstoß an CO₂ wird in China von 4,2 auf 9,2 Tonnen pro Jahr ansteigen, während Indien in der gleichen Zeitspanne nur einen Zuwachs von 0,3 Tonnen auf 1,5 Tonnen pro Kopf verzeichnet.

Eine detaillierte Übersicht über die Emissionen ist in Tabelle 10 zu sehen.

Tabelle 10: CO₂Pro-Kopf-Emissionen, nach International energy outlook, EIA DOE 2010, Seite 143

[http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/pdf/0383\(2010\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/pdf/0383(2010).pdf)

	1990	2007	2015	2020	2025	2030	2035	1990-2007 [Veränderung in %]	2007-2035 [Veränderung in %]
OECD	11	11,6	10,5	10,4	10,4	10,5	10,6	0,3	-0,3
USA	20	19,8	17,5	17,1	16,8	16,5	16,2	-0,1	-0,7
Europa	8,4	8,1	7,4	7,2	7,1	7,1	7,1	-0,2	-0,5
Japan	8,5	9,9	8,7	9	9,1	9,1	9,1	0,9	-0,3
Australien, Neuseeland	14,6	19,8	18,9	18,3	17,9	17,8	18,0	1,8	-0,3
China	2	4,7	5,6	6,4	7,3	8,2	9,2	5,2	2,4
Indien	0,7	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4		
Welt	4,1	4,5	4,3	4,4	4,6	4,8	5,0	0,5	0,4

4.8 Heidelberger Umwelt- und Prognoseinstitut, Folgen einer Massenmotorisierung, 1995

Dieser im Jahr 1995 veröffentlichte Studie wird in dieser Stelle Platz eingeräumt, da sie die PKW-Verhältnisse für das Jahr 2010 gut wiedergibt und auch Aussagen für die Zukunft trifft.

Das UPI beleuchtet in diesem Zusammenhang auch den Energieverbrauch und CO₂-

Ausstoß der PKW-Produktion, sowie weitere Schadstoffemissionen wie VOC, CO, NO_x und Lachgas also auch die Gefahr für den Menschen durch Verkehrsunfälle und die Folgen des Klimawandels. Die wichtigsten Ergebnisse aus dieser Studie sind in Tabelle 11 aufgelistet. Dargestellt sind Vergleiche zwischen dem Jahr 1995 und 2030.

Tabelle 11: Ergebnisse der UPI-Studie, Folgen einer Massenmotorisierung 1995

Jahr	1995	2030
Weltbevölkerung [Milliarden]	5.301	8.778
PKW Bestand [Millionen]	500	2.250
Neuzulassungen [Millionen]	50	235
Kraftstoffverbrauch [Millionen Tonnen]	650	1.300
CO ₂ -Emissionen [Milliarden Tonnen]	3,2	7,6

Dem UPI zufolge wird der kumulierte Erdölverbrauch zwischen dem Jahr 1995 und 2030 bei 41,6 Milliarden Tonnen Erdöl liegen (vgl. UPI: *Folgen einer Massenmotorisierung*, S.22) Das Gesamtsystem PKW mit Produktion, Betrieb und Entsorgung, soll bis zum Jahr 2030 87,7 Milliarden Tonnen Steinkohleneinheiten verbrauch was rund 60 Milliarden Tonnen Rohöl entspricht.

Die für den Verkehr benötigten Flächen sollen bis Jahr 2030 auf rund 200.000 km² also auf rund 40% der Gesamtfläche Deutschlands, anwachsen.

Das UPI hat die Äquivalentemissionen durch Betrieb und Produktion von PKW einmal berechnet: Mit folgendem Ergebnis. Von ursprünglich 4,4 Milliarden Tonnen CO₂ im Jahr 1995 soll bei steigendem Bedarf der Verbrauch auf rund 10 Milliarden Tonnen CO₂ in 2030 ansteigen.

4.9 Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Klimaschutz und PKW-Verkehr 2007 und Klimawirksame Emissionen des PKW Verkehrs, Wuppertal Spezial 2006

(Quelle: http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/klimaschutz-pkw.pdf)

Nach dieser Studie sollen die verkehrsbedingten CO₂-Emissionen weltweit im Jahr 2020 über 12.000 Megatonnen betragen, was einer Verdopplung der Werte von 2000 entspricht. Daher werden Maßnahmen diskutiert die der Einsparung von CO₂ dienen sollen. Solche Maßnahmen sind:

1. Einführung eines Flottenverbrauchlimits

Automobilherstellern und Verbrauchern werden mehr Spielräume eingeräumt, es wird kein einheitliches Emissionslimit eingeführt, sondern es sollen „Pufferzonen“ geschaffen werden. Liegt ein Fahrzeugtyp oberhalb der Emissionsgrenze, kann dies durch ein umweltfreundlicheres Modell kompensiert werden. Nach einer Hochrechnung des Institutes ist eine Kompensationssumme von 100 Euro pro extra Tonne emittiertes CO₂ adäquat, um Innovationen zu fördern.

2. Überarbeitung der KFZ-Steuer

Es wird eine Anpassung der Dieselbesteuerung an die von Normalbenzin vorgeschlagen, sowie eine Annäherung der Steuer an die CO₂-Emission. Eine europaweite gleiche Besteuerung von Kraftstoffen würde dem Tanktourismus entgegenwirken.

3. Durchsetzung eines generellen Tempolimits auf deutschen Autobahnen

Ein Tempolimit reduziert den Treibstoffverbrauch, die Lärmbelästigung und die Unfallwahrscheinlichkeit. Demgegenüber steht jedoch eine große Lobby aus Automobilherstellern und Politik, die vor allem Angst vor dem Verlust von Anhängern und Wählern hat.

Würden diese Zeile durchgesetzt werden, könnten nach positiven Schätzungen bis zu 30 % des Treibstoffes eingespart werden.

4. Car-Labeling

Der Begriff Car-Labeling beinhaltet das Anbringen von Infomaterial an Neuwagen, mit Hilfe dessen die umweltrelevanten Daten angegeben und mit Konkurrenzfahrzeugen verglichen werden können.

Auch das Wuppertal Institut sieht im Jahr 2030 die Verbrennungsmotoren weiterhin an der Spitze; Elektro-, Hybrid,- oder Wasserstoff machen weiterhin nur wenige Prozente aus. Die genaue Zusammensetzung ist in der folgenden Tabelle 12 aufgeführt, alle Angaben sind in Tausend.

Tabelle 12: Übersicht für verschiedene Antriebe nach WIKE in Tausend für Deutschland, 2007 Seite 45

(Quelle: http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/klimaschutz-pkw.pdf)

	1995	2000	2002	2010	2015	2020	2025	2030
Benzin-Antrieb	34.855	36.872	37.288	30.975	26.888	24.415	22.567	21.053
Diesel-Antrieb	5.545	5.961	7.308	15.761	20.180	22.097	22.582	22.325
Gas-Antrieb	1	3	6	136	517	1.198	2.042	2.712

Elektro- Antrieb	2	3	3	3	3	3	3	3
Brennstoffzellen- Antrieb	0	0	0	1	23	155	503	1.142
Gesamt	40.404	42.840	44.605	46.876	47.611	47.867	47.697	47.235

Die Verkehrsleistung soll in den nächsten zwanzig Jahren stagnieren, wobei der Energieverbrauch in Deutschland von 1.600 PJ auf 1.200 PJ in 2030 sinkt. Der weltweite Energieverbrauch hingegen wird bis zur Mitte dieses Jahrhunderts um 99 Exajoule (10^{18} Joule) ansteigen.

Hinsichtlich der Energieträger und der Gesamtfahrleistung wird im Jahr 2030 Diesel Antrieb gegenüber dem Benziner knapp bevorzugt sein: Alleine auf Diesel sollen 327,4 Milliarden Kilometer, also rund 56%, entfallen gekoppelt an eine dementsprechende Verbrauch von 14.600 Millionen Liter Diesel.

Schon die Nutzung der Klimaanlage schlägt mit einem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch von 0,5 l pro 100 km zur Buche, werden dazu noch Sitzheizung und Scheibenheizung verwendet, steigt der Verbrauch umso weiter an.

Die jeweiligen Einsparpotenziale sind extrem variable und hängen stark von den Eigenschaften des Fahrzeuges ab. Im Jahr 2008 existierte ein Konzept das durch Gewichtsreduktion, Einbau leichter Materialien und durch einen schnittigen Fahrzeugbau einen Kraftstoffverbrauch unter 2 Liter für 100 Kilometern versprach. Leider wurde das Loremo (**Low resistance mobile**) bisher nicht produziert. Nach einem Bericht des Unternehmens soll der Wagen allerdings ab 2011 in Serienproduktion gehen und ab 17.000 Euro erwerblich sein. (vgl. www.loremo.com)

4.10 Shell PKW- Szenarien bis 2030 (2004) und Shell LKW-Studie bis 2030 (2010)

(Quelle:http://www-static.shell.com/static/deu/downloads/aboutshell/our_strategy/mobility_scenarios/shell_mobility_scenarios.pdf)

Seit 1958 entwickelt der Shell Konzern Studien, die sich mit der Zukunft des Automobilverkehrs beschäftigen. So zum Beispiel die im Jahr 2004 veröffentlichte Studien zur PKW-Entwicklung bis zum Jahr 2030 unter dem Motto *Flexibilität bestimmt Motorisierung* und eine Studie zur LKW-Entwicklung. Dazu werden Szenarien entwickelt: Für diese Studie wurden ein *Traditions-* und ein *Impulsszenario* konstruiert, die im Folgenden kurz beschrieben werden sollen.

Traditionsszenario:

Das Traditionsszenario beschreibt eine Tendenz, dass die Bevölkerung skeptisch gegenüber Veränderungen reagiert: Die Arbeitslosenquote wird 4,5 Prozent betragen und das Konsumverhalten der Deutschen ist eher vorsichtig. Die Bevölkerung steht der Globalisierung kritisch gegenüber und vom Staat wird Sicherheit gefordert. Es ist allerdings nicht als *Worst-Case-Szenario* zu betrachten. Politische und gesellschaftliche Veränderungen haben eine Verzögerungs- bzw. Eingewöhnungsphase. Das wirtschaftliche Wachstum im Jahr 2030 soll um 1,6 % wachsen, wobei Deutschland unter schwachen Geburtsraten leiden wird.

Impulsszenario:

Das Impulsszenario geht davon aus, dass weitestgehend politische, gesellschaftliche und technologische Einsicht und auch Fortschritt herrscht. Kontinuierliches wirtschaftliches Wachstum um die 2 % wirkt beruhigend und motivierend auf die Bevölkerung bezüglich der eigenen Mobilität. Der Anteil der Arbeitslosen soll nur noch 3,4 Prozent ausmachen und die Deutschen sollen sich wieder am Konsum erfreuen.

Die Gesamtbevölkerung Deutschlands wird dennoch bis zum Jahr 2030 um rund 2

Millionen Menschen zurückgehen.

Shell erwartet für die gesamte EU weiteres BIP-Wachstum, was durch eine Osterweiterung sowie zunehmende Handelsbeziehungen zurück geführt werden kann. Das soziale Produkt kann verdoppelt werden und die weltweiten Exporte können sich bis zu Jahr 2030 verdreifachen.

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Shellstudie für das Jahr 2030.

Tabelle 13: Ergebnisse der Shellstudie 2009

Bis 2030	Traditionsszenario	Impulseszenario
Grad der Motorisierung [Anzahl pro 1000 Einwohner]	725	785
Zuwachs seit 2004 [%]	9	18
PKW-Bestand [Millionen]	49	53,5
Durchschnittliche Fahrleistung [km]	10.600	10.500
Gesamtfahrzeugkilometer [Milliarden Kilometer]	518	563
Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch [l/100 km]	6,9	6,5
CO ₂ -Emission [Millionen Tonnen]	78	79
CO ₂ -Reduktion gegenüber	30	29

Referenzjahr [%]		
Gesamtkraftstoffverbrauch [Millionen Tonnen]	27	28

Es ist in naher Zukunft nicht damit zu rechnen, dass der Verbrennungsmotor seine Wichtigkeit gegenüber alternativen Antrieben verlieren wird. Daher müssen die ehrgeizigen Klimaschutzziele verschiedener Institutionen durch Effizienzsteigerung, Fahrzeugbauoptimierung oder die Erforschung neuwertiger Kraftstoffe erreicht werden.

Nach der Präsentation der PKW-Studien, sollen nun auch die Ergebnisse der LKW-Studie werden auf der nächsten Seite dargestellt (Quelle: http://www.shell.de/home/content/deu/aboutshell/our_strategy/truck_study/).

Derzeit sind rund 2,5 Millionen LKW auf deutschen Straßen unterwegs und haben einen Anteil von 70 % am gesamten Güterverkehr mit 4 Milliarden Tonnen Güteraufkommen. In der Shell-Studie werden alle Fahrzeugtypen aufgeführt, die als Nutzfahrzeuge zugelassen sind, hauptsächlich dem Transport von Waren dienen und ein Gewicht zwischen 3,5 und 44 Tonnen aufweisen. Ein 40-Tonnen-Sattelzug verbraucht zwischen 35 und 40 Litern Diesel auf 100 Kilometern. Die Güterverkehrsleistung, also die Multiplikation von Güteraufkommen und erbrachten Kilometern, lag in den letzten Jahren bei rund 670 Milliarden Tonnenkilometern. Shell erwartet weitere Anstiege in den Transportweiten, Transportaufkommen und Milliarden Tonnenkilometern.

In der EU-27 soll der Gesamtgüterverkehr im Jahr 2030 auf 3.429 Milliarden Tonnenkilometern steigen. In Deutschland wird die Gesamtverkehrsleistung auf 1.073 Mrd. Tonnenkilometer ansteigen, der Güterverkehr wird sich auf 817 Mrd. Tonnenkilometern im Jahr 2025 erhöhen.

Der Shell-Studie zufolge sollen ferner die CO₂-Emissionen aus dem Güterverkehr um bis 55,5 % steigen, gegenüber 2005 (2,65 kg CO₂ pro Liter Dieselmotorkraftstoff). Diese Entwicklung der CO₂-Emissionen im Güterverkehr wird auf der kommenden Abbildung dargestellt:

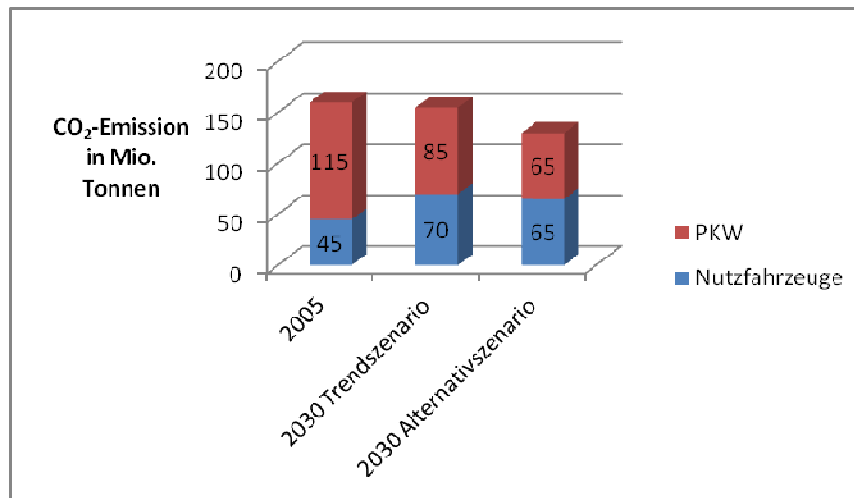


Abbildung 15: CO₂-Emissionen im Güterverkehr für Deutschland, nach Shell-LKW-Studie 2009, Seite 31

Die Shell-Studie erklärt sich diese Entwicklung dadurch, dass alternative Antriebe sich im PKW-Sektor schneller durchsetzen.

Das Aufkommen von Nutzfahrzeugen in Deutschland soll in den nächsten 20 Jahren auf rund 3 Millionen Einheiten anwachsen.

Nutzfahrzeuge, dienen wie ihr Name verraten, einem Nutzen und nicht dem Privatvergnügen des Fahrers. Daher sind LKW in Sachen Effizienz schon auf hohem Niveau. In Dingen Fahrzeugbau und eingesetzten Werkstoffen sind noch Einsparpotenziale durch Gewichtsreduktion oder Verringerung des Luftwiderstand möglich. Auch die europaweite Geschwindigkeitsreduktion auf maximal 90 km/h haben die Hersteller dazu gebracht, den optimalen Betriebspunkt in diesen Geschwindigkeitsbereich zu legen.

Forschungsansätze für alternative Antriebe und Brennstoffe existieren durchaus, spielen aber eine untergeordnete Rolle. Im Jahre 2009 wurden beispielsweise nur 79 Hybrid und 874 Elektro-Nutzfahrzeuge zugelassen.

Die Standardverbrennungsmotoren werden in diesem Sektor auch in den kommenden Jahren die dominierende Rolle spielen. Dafür gibt es folgende Gründe:

Zum einen laufen die Nutzfahrzeuge laufen schon auf Optimum; zum Anderen sind alternative Antriebe und Kraftstoffe sind mit Mehrkosten verbunden, die im Logistik

und Transportwesen wegen geringer Gewinnmargen nicht vom Unternehmen getragen werden.

4.11 Mobilitätsentwicklung bis 2050, BMVBS, 2006

(Quelle:

<http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/31892/publicationFile/10780/mobilitaetsentwicklung-2050.pdf>

Das Jahr 2004 wurde für die Studie als Rechengrundlage für 2025 genommen. Aufgrund der vielschichtigen Verflechtungen im Verkehrssektor sollen durch die Prognose die CO₂-Emissionen im Jahr 2025 berechnet werden können. Der Fokus wird nicht auf den Straßenverkehr gelegt, sondern auf die gesamtdeutsche Transportstruktur.

Der Einwohnerschwund Deutschlands wird in dieser Studie mit einem Prozent jährlich und die Einwohnerzahl mit 81,7 Millionen im Jahr 2035 angegeben. Die Alterspyramide Deutschlands hat einen direkten Einfluss auf die mit Rad und Fuß zurückgelegten Kilometer. Menschen werden immer älter, wollen sich aber nicht persönlich einschränken lassen, wenn es der körperliche Zustand nicht mehr zulässt. Dies hat einen Anstieg der getätigten Wege im Auto pro Tag zur Folge. Es werden rund 3,4 Wege pro Tag mit dem PKW zurückgelegt, mit einer durchschnittlichen Reiseweite von rund 11 Kilometern. Der Motorisierungsgrad der älteren Bevölkerung wird von einer vom Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Stadtentwicklung in Auftrag gegebenen Studie beschrieben und soll um 19 % auf 0,481 PKW pro Person in der Gruppe der Menschen über 65 Jahre steigen (vgl. *Mobilitätsentwicklung 2050*, unter anderem TRAMP und das Deutsche Institut für Urbanisierung 2006, S.118). Der PKW-Bestand soll aber in der gleichen Periode von 45,376 auf 51,059 Millionen ansteigen, was einen Motorisierungsgrad von 625 Fahrzeuge pro 1.000 Einwohner zur Folge hätte. Damit würde fast jeder Deutsche, der ein Fahrzeug fahren darf, auch eines besitzen. Durch ansteigendes Verkehrsaufkommen wird auch die Verkehrsleistung

stetig zunehmen, insgesamt auf 1.368 Mrd. Personenkilometer. Interessant ist auch die Gegenüberstellung der Urbanität mit dem Motorisierungsgrad. Je höher die Urbanität desto geringer der Grad, im Schnitt 398 Fahrzeuge pro 1.000 Einwohnern. In ländlichen Gebieten hingegen steigt der Anteil auf bis zu 542 Fahrzeuge (vgl. BMVBS: *Szenarien der Mobilitätsentwicklung*, S.43)

Ferner geht die Studie davon aus, dass sich wirtschaftlicher Wohlstand positiv auf die Entwicklung des Individualverkehrs auswirkt: Es werden 10 % mehr Fahrten durchgeführt als noch im Jahr 2004 (57,3 Milliarden pkm). Das Institut sieht den größten Zuwachs des Individualverkehrs in Urlaubsfahrten, liefert aber dafür keine Erklärung. Durch steigende Urbanisierung sinkt aber die Verkehrsleistung in Arbeitsfahrten sowie beim Einkaufen.

Auch das Verkehrsaufkommen und transportierte Güter und Waren werden bis 2025, insgesamt auf 4.622 Millionen Tonnen expandieren, was eine Steigerung um 28% bedeutet.

Wenigstens wird das Kyoto-Protokoll eingehalten und die straßenbedingten CO₂-Emissionen sinken um 11 % auf 142 Millionen Tonnen. Der Anteil des Flugverkehrs wird aber im gleichen Zeitraum um 56 % zunehmen.

Beängstigend ist die Annahme des ITP, dass der Flugverkehr jährlich mit 3,5 % zunehmen soll. Dies würde zu einer Passagierzahl von 220 Millionen und 103 Milliarden Personenkilometern gipfeln, die Auswirkungen durch Lärmbelastigungen, des Verlusts von Grünflächen durch Flughafenausbauten und die dadurch entstehenden Umweltbelastungen sind nur zu erahnen.

5 Modellierung und Bewertung

Dieses Kapitel befasst sich mit den Grundlagen der Modellierung, präsentiert eigene Ergebnisse und vergleicht diese mit bestehenden Studien, um am Ende Aussagen für die zur Klimawirksamkeit des Verkehrs machen zu können.

Grundlage für die Kohlenstoffbilanzierung in der Atmosphäre ist der globale Kohlenstoffkreislauf (vgl. S.20), wobei von einem Box- oder Kompartiment-Modell ausgegangen wird. Das Kompartiment Atmosphäre wird durch die Nutzung fossiler Rohstoffe und somit die entstehenden Emissionen gestört. Gleichzeitig wirkt das Kompartiment Landbiosphäre jedoch als Senke für atmosphärisches CO₂, ist aber zugleich Quelle für CO₂ durch Rodungen der Wälder. Das Kompartiment Ozean ist als wesentliche und langfristige CO₂-Senke zu betrachten (vgl. Abbildung 3)

In der Abbildung 16 werden mehrere Modelltypen vorgestellt, bei denen ein Input und Output von Materie, Energie oder Information, oder eine Kombination derselben stattfindet.

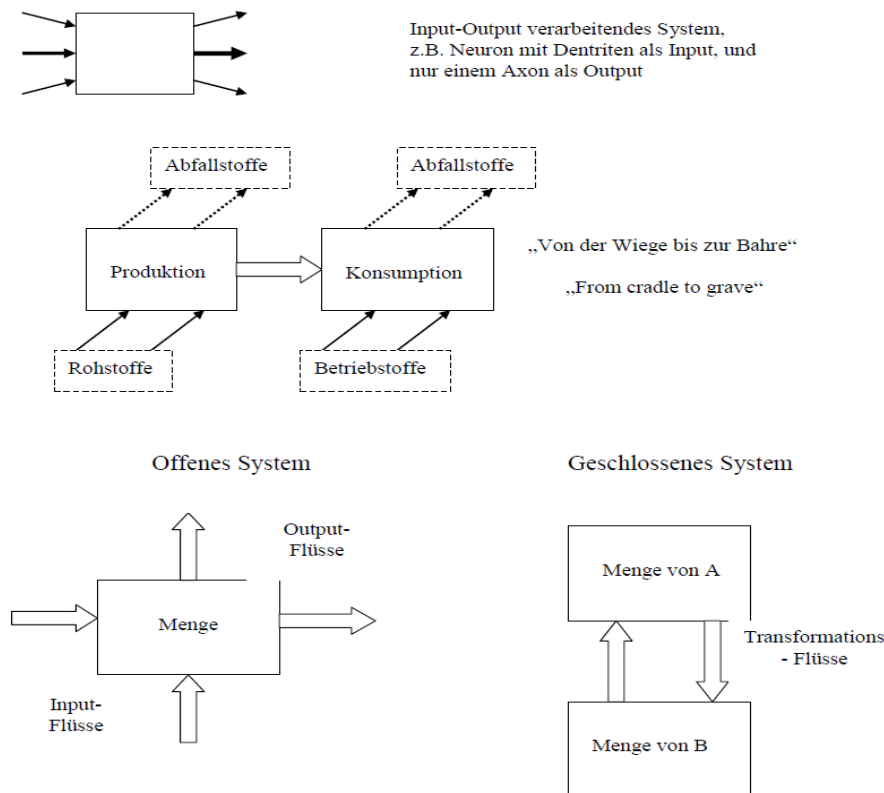


Abbildung 16: verschiedene Boxmodelle

Typisch im Beispiel für die Verarbeitung von Information sind mehrere Eingangskanäle in das verarbeitende System und ein oder mehrere Ausgangskanäle, wie beispielsweise bei der synaptischen Kommunikation: Dendriten, Neuronzellkörper, und Axon. Das verarbeitende System selbst bleibt in diesem Fall unverändert. Im mittleren Teil der Abbildung wird ein Beispiel für das in der Umweltanalyse wichtige Werkzeug der „von der Wiege bis zur Bahre-“ oder Lebenszyklus-Analyse gezeigt. Es werden sämtliche Ausgangsstoffe (Inputs), das erzeugte Produkt selbst sowie die Abfallprodukte oder Schadstoffemissionen (Outputs) bei der Produktion und Konsumption betrachtet. Im Falle eines PKWs sind die bei der Herstellung entstehenden CO_2 -Ströme etwa 25% jener CO_2 -Ströme, die über die gesamte Betriebsdauer anfallen. Weiterhin sollte die bei der Vorkette der Benzinherstellung aus Rohöl entstehenden CO_2 -Ströme mit einbezogen werden (etwa 20% der CO_2 -Betriebsstoffströme); sowie jene CO_2 -Ströme die bei der Erneuerung und beim Neubau von Straßenverkehrswegen entstehen (etwa 5-10% der Betriebsstoffströme). Im unteren Teil werden Beispiele für Boxmodelle gezeigt, die beim globalen Kohlenstoffkreislauf, bei der Bilanzierung von Produktion und Bestand von Fahrzeugen, und auch bei der Strahlungsbilanz eine wichtige Rolle spielen. Hier sind neben den Inputs und Outputs der Inhalt der Box und seine zeitliche Veränderung, also die Dynamik, von Interesse. Die grösste Modelldarstellung kennt im Falle einer Box nur einen Input und keinen Output. Dies ist z.B. der Fall für exponentielles Wachstum, wo das Wachstum sich so lange fortsetzt, bis es an seine Systemgrenzen kommt. Ein bekanntes Beispiel ist die Oberflächenbedeckung eines Teichs mit Seerosen. Am Starttag 1 ist nur ein geringer Teil des Teiches mit Seerosen bedeckt, die sich in der Weise verdoppeln sollen, dass ihre Bedeckung des Teichs jeden Tag um den Faktor 2 wächst, bis nach 29 Tagen die Hälfte des Teichs bedeckt ist. Die Frage stellt sich dann dem Betrachter, wann das System Teich/Seerosen an seine Grenzen stößt. Offensichtlich am 30. Tag.

Die folgenden Seiten betrachten die mathematischen Grundgleichungen der Modellierung:

Beim exponentiellen Wachstum wird der Input proportional zur ersten Potenz der Masse gesteuert; der Fluss ist dann charakterisiert durch eine Geschwindigkeitskonstante erster Ordnung:

$$dx/dt = kin * x \quad (12)$$

Das System erkennt selbst die Obergrenze K =Kapazitätsgrenze bei der logistischen Funktion:

$$dx/dt = kin * x * \{(K - x)/K\} \quad (13)$$

Multipliziert man die obige Klammer aus, so erkennt man, dass die logistische Funktion einem linearen Input und einem nicht-linearen, hier quadratischen Output folgt. Das System ist in diesem Fall stabil, es nähert sich im zeitlichen Verlauf dem Grenzwert an. Der häufigste Fall mit Stabilität ist ein zeitlich konstanter Input und ein linear abhängiger Output von der Systemgröße:

$$dx/dt = Fin - kout * x \quad (14)$$

Das System strebt einem Fließgleichgewicht zu, das sich durch Nullsetzen der linken Seite direkt ergibt:

$$x_{00} = Fin/kout \quad (15)$$

Sehr oft ist der Inputfluss zeitlich abhängig, z.B. wird er durch eine zunehmende Funktion vom Exponentialtyp charakterisiert:

$$dx/dt = Fin_0 * \exp(kin * t) - kout * x \quad (16)$$

Hier wird ein bewegter Fließgleichgewichtszustand nach Überwindung der Anfangsbedingungen erreicht, der beschrieben wird durch:

$$x_{000} = Fin_0 * \exp(kin * t)/(kin + kout) \quad (17)$$

Zunächst ist man etwas erstaunt darüber, dass im Nenner des obigen Ausdrucks für den bewegten Fließgleichgewichtszustand die Summe $(kin+kout)$ steht und nicht nur $kout$, wie man erwarten würde, wenn man die rechte Seite näherungsweise gleich Null setzt. Man erkennt aber sofort bei der Integration der Differentialgleichung in der exakten Lösung dass die Summe der beiden Konstanten auftritt. In der Gleichung 17 interessiert an erster Stelle, dass die Bestandsgröße x denselben exponentiellen Anstieg übernimmt wie die treibende Flussgröße. Auf Automobile übertragen heißt dies, dass ein exponentieller Zuwachs in der Produktion, d.h. in der Autoregistrierung, denselben Zuwachs, charakterisiert durch k_{in} , im Bestand der Fahrzeuge nach sich zieht und zwar unabhängig vom relativen Anstieg von der Geschwindigkeitskonstante des

Outputs. Die Betragsgröße von x ist von k_{out} in dem Sinne abhängig, dass je kleiner k_{out} , desto größer x_{000} .

Abbildung 17 zeigt das Ergebnis einer exponentiellen und einer logistischen Modellierung bezüglich der weltweiten Fahrzeugbestände. Um die jährlichen Zuwachsraten besser sichtbar zu machen wurde die blaue Kurve mit einem Faktor 10 verrechnet. Die jährliche Zuwachsrate beträgt $k=3,4\%$, als Basis wurde ein weltweites Fahrzeugaufkommen von $x_0=390$ Millionen gewählt (Niveau von 1980). Das Sättigungsmaximum wurde auf $k_{log}=6000$ Millionen gesetzt.

Das exponentielle Wachstum wurde mithilfe einer Vorwärtsintegration der Form:

$x_1 = (1+k) \cdot x_0$ berechnet, der logistische Ansatz mit der Gleichung:

$$x_1 = x_0 + k \cdot \ln \left(\frac{x_0 \cdot (k_{log} - x_0)}{k_{log} \cdot (x_0 - x_1)} \right) \cdot x_0$$

Eine Sättigungsgrenze von 6,0 Milliarden Fahrzeugen würde bei einer Weltbevölkerung von 8,5 Milliarden, ein Motorisierungsgrad von 0,706 bzw. 706 Fahrzeuge/(1.000 Einwohner) implizieren, daher endet die blaue Kurve abrupt bei 6 Milliarden Fahrzeugen (vgl. Anhang, Abbildung 3, exponentielles Wachstum von KFZ). Die logistische Kurve, hier in grün, nähert sich nur langsam der oberen Grenze an, bei ursprünglich gleichem anfänglichem Wachstum; die rote Kurve gehört zum exponentiellen Wachstumstyp gibt aber nicht den Bestand, sondern die jährliche Veränderung des Bestands an.

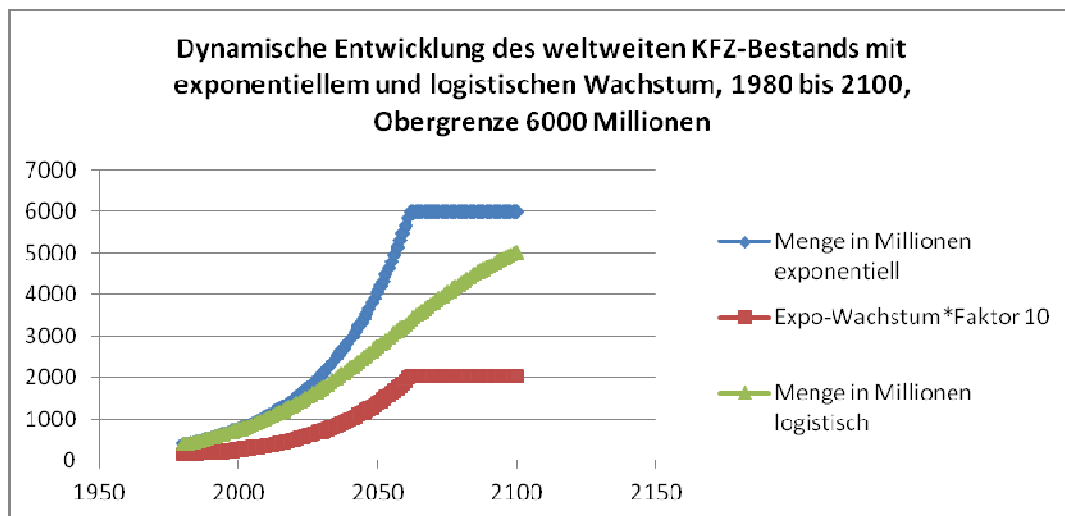


Abbildung 17: Dynamische Entwicklung des weltweiten KFZ-Bestandes, verschiedene Ansätze, eigene Modellierung

In Tabelle AMV 10 (Seite KFZ Bestand) werden in den ersten 3 Spalten Daten aus verschiedenen Studien wie dem WOO oder Dargay et al. in ihrem zeitlichen Verlauf angegeben. Diese dienen als Grundlage für die dynamische Modellierung nach einem exponentiellen und logistischen Modell. Anfangszeitpunkt ist 1980 mit dem Wert von 390 Mio. Kraftfahrzeugen. Die beste Modellierung bis zum Zeitpunkt 2009 gelingt mit einer Wachstumsrate von 3,4% entsprechend einer mittleren Wachstumskonstante von $k=0,034/\text{Jahr}$. Bei diesem ungebremsten Wachstum würde die Zahl der KFZ auf etwa 2.075 Millionen oder etwa 2,1 Milliarden im Jahr 2030 ansteigen. Interessanterweise ist dies auch fast genau der Wert eines nach Ländern disaggregierten Modells von Dargay, Gately und Sommer, bei denen die Automobilflotte im Jahr 2030 auf die beängstigte Größe von 2.080 Millionen ansteigt. In der Entwicklung der weltweiten Fahrzeugflotte sind sich die Studien ziemlich einig. Nach Angaben der IEA wird der weltweiten PKW-Bestand in den nächsten zwanzig Jahren auf über 2 Milliarden (2,6 im High-Baseline-Szenario) steigen, die OPEC-WOO (World Oil Outlook) gibt in ihrem Bericht eine PKW-Anzahl von 1.372 Millionen im Jahr 2030 an und weitere 352 Nutzfahrzeuge, ein Jahr später erscheint in dem WOO-2010 eine Prognose für 2030 mit 1.452 Mio. PKW und 390 Mio. Nutzfahrzeugen, zusammen 1842 Kraftfahrzeuge. Das Heidelberger Institut UPI gab schon 1995 die Zahl 2,25 Milliarden Fahrzeuge für das Jahr 2030 an. Die deutschen Studien haben eine gewisse Spannweite: Das Wuppertalinstitut errechnet 47 Millionen Fahrzeuge für Deutschland, die Mobilitätsstudie der Bundesregierung rechnete mit 51 Millionen Fahrzeugen und der Shellkonzern gibt 49 bis 53 Millionen deutsche Fahrzeuge in 2030 an. Dies ähnelt auch dem Titel eines Buchers der beiden Automobilexperten Deborah Gordon und Daniel Sperling "Surviving Two Billion Cars: Driving Toward Sustainability". Nun umfasst aber die Vorhersage der OPEC in ihrem World Outlook 2009 nur 1724 Millionen Fahrzeuge für das Jahr 2030. In Übereinstimmung der Jahreswachstumsrate bis 2010 von etwa 3,4% und einem Abschwächen der Rate in den darauffolgenden Jahren kann durch Anwendung der logistischen Funktion auch dieser Sachverhalt beschrieben werden, der dann eintreten wird, wenn die Randbedingungen für die Produktion aus ökonomischen oder ökologischen Gründen, wie verstärkte

Luftverschmutzung und globaler anthropogener Treibhauseffekt, stringenter werden. Die bisherige Rate des Bestands von 3,4% ist auch insofern interessant, als dass die Automobilproduktion in den für uns bekannten Zeitraum von 1999 bis 2009 ebenfalls um 3,45% angestiegen ist. Nach Gleichung 17 haben aber die treibende Flussgröße: die Produktion und der Bestand im Fließgleichgewicht denselben exponentiellen Anstieg, also 3,4 % pro Jahr.

Der einfachste Fall eines geschlossenen System wird durch zwei Boxen charakterisiert, mit der Menge x_A des Stoffes A, und der Menge x_B des Stoffes B. Bei jedem Übergang von der Box A in die Box B wandelt sich der Stoff von A in B um und umgekehrt. Hier wird der Output des System A zum Input des Systems B, mit dem Fluss

$$F_{AB} = k_A * x_A \quad \text{und} \quad F_{BA} = k_B * x_B \quad (18)$$

Im Fließgleichgewicht gilt dann:

$$\frac{x_{A00}}{x_{B00}} = \frac{k_B}{k_A} \quad (19)$$

Das Verhältnis $K = k_B/k_A$ ist die entsprechende Gleichgewichtskonstante.

Bei der Modellierung lässt sich also in gewisser Annäherung ein exponentielles Wachstum annehmen. Die Modellierung von Gleichung 12 erfolgt am besten schrittweise mit Microsoft EXCEL: Dabei wird die Differentialgleichung in eine Differenzgleichung umgewandelt, wobei für die Vorwärtsintegration gilt:

$$\begin{aligned} (x_1 - x_0)/(t_1 - t_0) &= kin * x_0 \Rightarrow x_1 = (1 + kin) * x_0; \\ \text{bzw. } x(i) &= (1 + kin) * x(i - 1) \\ \text{mit gleicher Zeitschrittlänge: } \Delta t &= t_1 - t_0 = t(i) - t(i - 1) = 1 \text{ und } \Delta t \leq 1/kin \end{aligned} \quad (20)$$

Die exakte Integration der Differentialgleichung in diesem Fall möglich:

$$x(ti) = x(0) * \exp(kin * (ti - t0)) \quad (21)$$

Auch die Entwicklung des atmosphärischen CO₂ sollte anhand existierender Daten modelliert und mit bestehenden Modellen verglichen werden.

Unter AMK1 wurden die Daten des CO₂ Anstiegs in der Atmosphäre, wie sie durch die

Mauna Loa Kurve gegeben sind, ebenfalls an eine Exponentialfunktion und eine logistische Funktion mit den zwei asymptotischen Werten 450 und 535 ppm CO₂ angepasst. Für die reine Exponentialfunktion wird eine ziemlich gute Übereinstimmung für die Wachstumskonstante 0,022 (2,2%) erhalten, wenn der Basiswert vor der Industrialisierung von 280 ppm herausgenommen wird. Die Modellierung startet entsprechend mit 58 ppm CO₂ in 1980, zu der dann der Basiswert addiert wird (338 ppm). Auch hier wird sich die Exponentialfunktion jenseits von 2010 nicht fortsetzen können. Da der jetzige Wert schon 390 ppm erreicht hat, lassen sich mit der logistischen Funktion nur Werte jenseits dieses Bereichs beschreiben. Gewählt wurden Werte von 450 und 535 ppm. Beim Wert von 535 ppm wurde dann auch die reine Exponentialfunktion abgeschnitten (siehe Abbildung 18, Anhang Abbildung 4 sowie AKM 1). Ein Vergleich mit dem disaggregierten Joos Box-Modell zeigt eine sehr gut Übereinstimmung bis 2010, wobei dann das Joos-Modell eher geradlinig weiterläuft, wenn die Emission von THG keinen abrupten Einbruch erlangt. Das Joos Box Modell wurde vom Schweizer Fortunat Joos der Uni Bern entwickelt und ist unter der Webadresse: <http://www.climate.unibe.ch/jcm/> nachzulesen.

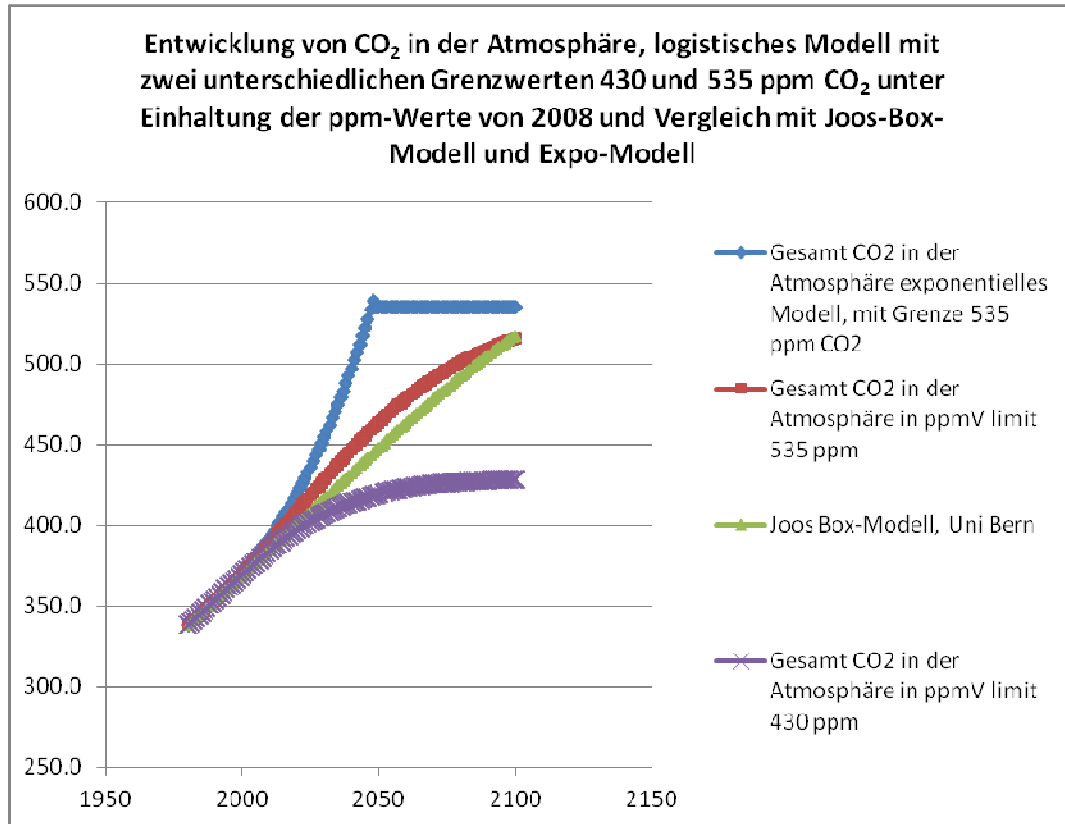


Abbildung 18: Entwicklung des atmosphärischen CO₂, eigene Modellierung

Die kausale Beschreibung der Dynamik des CO₂-Anstiegs erfordert die Kenntnis des CO₂-Inputs aus der Ökonosphäre oder Technosphäre sowie den Austausch der Atmosphäre mit der Landbiosphäre und den Ozeanen. Der CO₂-Strom kann nach dem japanischen Ökonomen Yoichi Kaya durch die nach ihm benannte Identität beschrieben werden, die eine bessere Übersicht in die ökonomischen Zusammenhänge vermittelt. Oft wird der CO₂-Ausstoß eines Landes durch den pro-Kopf-Ausstoß charakterisiert. Dieser kann in der Kaya-Identität wie folgt beschrieben werden:

$$\left(\frac{\text{CO}_2\text{-Ausstoß}}{\text{Bevölkerung}} \right) = \left(\frac{\text{CO}_2\text{-Ausstoß}}{\text{Energieverbrauch}} \right) \cdot \left(\frac{\text{Energieverbrauch}}{\text{BIP}^*} \right) \cdot \left(\frac{\text{BIP}^*}{\text{Bevölkerung}} \right)$$

Emissionen pro Kopf Kohlenstoffintensität Energieintensität Arbeitsproduktivität

(*BIP: Bruttoinlandsprodukt, wichtige Einheit für die Wirtschaftskraft eines Landes)

Mithilfe von ökonomischen Eckdaten wie dem BIP (englisch GDP) und der

Bevölkerungszahl lassen sich durch die Kaya-Formel energiewirtschaftliche Daten ins Verhältnis setzen und somit den CO₂-Ausstoß pro Kopf berechnen.

Im letzten Punkt der Modellierung soll der Bogen gespannt werden zwischen existierenden Fahrzeugen, benötigte Energiemenge, CO₂-Emissionen und den Klimaauswirkungen.

Nach eigener Modellierung, unter Berücksichtigung einerseits der Dargay und Gately Daten und den OPEC Hochrechnungen, können die Gesamtemissionen im Jahr 2030 mit einem Anteil des Straßenverkehr von etwa 20%, zwischen 35 Gt (abnehmender pro-Fahrzeug-Verbrauch OPEC) und 57 Gt CO₂ (konstanter pro-Fahrzeug-Verbrauch Dargay) liegen. Der Verkehr hätte dann Emissionen von 7 bzw. 11 Gigatonnen (Rechnung siehe Anhang CD-AKM 2-Temperaturerhöhung, Tabelle 1A.). Wie bereits in Gleichung 1 beschrieben besteht ein Zusammenhang zwischen CO₂-Emissionen und Strahlungsantrieb sowie einer möglichen Temperaturerhöhung. Der Strahlungsantrieb und die Temperaturerhöhung wurden in AMK2 unter Tabelle 1B berechnet. Die unterschiedlichen Parameter in den verschiedenen Studien entstanden:

- Wachstum mit 3,36 % nach Dargay et al. im Fahrzeugflottenzuwachs
- Jährliche 2,2% Steigerung, nach dem atmosphärischen CO₂-Anstieg der Mauna Loa-Werte durch anthropogene Inputs zwischen 1980 und 2010
- eine exponentielle Rate von 1,2%, entsteht durch die Differenz aus der Schätzung aus der OPEC-Flottenzuwachsrates von 2,58% und der OPEC-Effizienzsteigerung von 1,41%

Auf der folgenden Tabelle sind die errechneten Werte für Strahlungsantrieb und Temperaturerhöhung angegeben. Der Strahlungsantrieb wurde weiter oben schon definiert und ist bezüglich CO₂ durch $5,35 \cdot \ln[(\text{CO}_2(t)/278)]$ gegeben. Für den Anfangswert im Jahr 2010 mit 390 ppm errechnet sich ein Wert von 1,811. Untersucht werden in der unten stehenden Tabelle die schon beschriebenen vier exponentielle Steigerungsrates bis 2030, die jeweils in der Spaltenüberschrift näher bezeichnet sind.

Aus dem Wert der atmosphärischen CO₂-Konzentration in 2010 und den berechneten Steigerungsraten bis 2030 ergeben sich dann der Strahlungsantrieb 2030 und die Differenz des Strahlungsantriebs zwischen 2010 und 2030. Aus der Differenz des Strahlungsantriebs lässt sich Differenz der potentiellen Gleichgewichtstemperaturen mit Gleichung 2 berechnen. Im IPCC-Bericht von 2007 wird eine Spannweite von 2 bis 4,5°C für den möglichen Temperaturanstieg, bei einer Verdopplung der atmosphärischen CO₂-Konzentration angegeben (die Berechnungen sind unter AMK 2 im Anhang nachzulesen).

Tabelle 14: Ergebnisse zum Strahlungsantrieb und Temperaturerhöhung

Berechnungsgrundlage	OPEC: Flottenwachstum mit Effizienzsteigerung	Dargay et al. Wachstum – mit Effizienzsteigerung	Mauna Loa: jährlicher Zuwachs bei 2,2% (1980-2010) hochgerechnet	Dargay et al.: Wachstum ohne Effizienzsteigerung
Jährliche Zuwachsrate ab 2010 (390 ppm)	1,20%	1,95%	2,20%	3,36%
Strahlungsantrieb im Jahr 2030	2,21	2,49	2,59	3,10
Differenz des Strahlungsantriebs 2030 -2010 CO ₂ bedingt	0,39	0,68	0,78	1,28
Potentielle Temperaturdifferenz pro Dekade bei 2,0°C Zunahme/CO ₂ -Verdopplung	0,11	0,18	0,21	0,35
Potentielle Temperaturdifferenz pro Dekade bei 4,5°C Zunahme/CO ₂ -Verdopplung	0,24	0,41	0,47	0,78

Die potentielle Temperaturerhöhung liegt bei maximal 0,35°C pro Dekade und minimal bei 0,11 °C bei einer angenommenen 2°C Erhöhung pro CO₂-Verdopplung. Bei der 4,5°C Annahme verschieben sich die Breiten von 0,24 °C auf maximal 0,78 °C pro Dekade; übersteigen also wesentlich eine Temperaturerhöhung von 0,1°-0,2°C pro Dekade. Wollte man dem Verkehr eine differentielle Temperaturerhöhung auf Grund der CO₂-Emission allein zuschreiben, so wären die letzten beiden Zeilen mit jeweils 0,26 zu multiplizieren.

6 Elektromobilität

Die fossilen Brennstoffe sind endlich, die Alternativen zum Individualverkehr beschränkt. Kapitel 6 dient dazu, die Elektromobilität näher zu beschreiben, denn ihr wird eine große Zukunft vorhergesagt.

Ein Elektrofahrzeug kann entweder rein elektrisch durch Batterien betrieben werden, oder mit einem kleinen Verbrennungsmotor, dem sogenannten range extender. Eine andere mögliche Bauart ist der Hybrid (s. Kapitel 3.2.1). Der benötigte Strom kommt dabei aus biogen, solar, geothermisch oder fossil betriebenen Stromgeneratoren. Automobilhersteller setzen bei der Produktion vermehrt auf leichte Materialien, um die schweren Batterien im Gesamtgewicht zu kompensieren

Momentan sind 16 reine (relativ unbekannt) Elektrofahrzeuge, wie der City El, der Mega e-City oder der Tesla Roadster auf dem deutschen Markt (vgl.

[http://www.forum-elektromobilitaet.de/assets/mime/c99b69a40f072e4d840634f831c6c208/Übersicht%20Elektroautos%20auf%20dem%20Markt%20\(Stand%20Mai%202010\).pdf](http://www.forum-elektromobilitaet.de/assets/mime/c99b69a40f072e4d840634f831c6c208/Übersicht%20Elektroautos%20auf%20dem%20Markt%20(Stand%20Mai%202010).pdf)

). Weitere 15 Fahrzeuge, wie der Citroen C Zero, der Ampera von Opel oder der Peugeot iOn befinden sich in der Entwicklungsphase und sollen wie der Citroen C-Zero noch dieses oder nächstes Jahr auf den Markt kommen.

Ein Elektromotor hat eine Energieeffizienz von 80 bis zu 90%. Dies ist gegenüber dem Verbrennungsmotor mit einer maximalen Effizienz von 30% nur dann ein

entscheidender Vorteil, wenn die elektrische Energie nicht fossil gewonnen wird. Weitere Pro-Argumente sind der emissions-, und lärmfreie Betrieb, die Rückgewinnung von Bremsenergie sowie die Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen.

Kritiker verweisen hingegen auf die noch geringe Reichweite von zumeist 150-250 km zumeist, teils sehr langen Ladezeiten bis 10 Stunden und den hohen Anschaffungspreis ab 10.000 Euro. Um einen längerfristigen Erfolg möglich, zu machen ist ein Zusammenspiel von Wirtschaft, Politik und Gesellschaft erforderlich.

Die größte technische Herausforderung besteht darin, das Gewicht der Batterie möglichst klein zu halten, dabei aber gleichzeitig die Reichweite und die Fahrdynamik hochzuhalten. Ein weiteres Problem ist eine bisher fehlender aber dringend benötigte Infrastruktur an Tankstellen.

Da die Anschaffungskosten des Elektroautos um ca. 40% - 50% höher sind als beim Auto mit normalem Verbrennungsmotor, wird eine breitere Einführung erst dann möglich sein, wenn gesetzliche Vorschriften über die Emissionen dazu zwingen oder staatliche Förderungen locken.

Bundeskanzlerin Angela Merkel und der damalige Verkehrsminister Wolfgang Tiefensee wollen auf deutschen Straßen im Jahr 2020 über eine Million Elektrofahrzeuge sehen. Dafür wurde viel Geld für die Forschung und Entwicklung von leistungsfähigen Batterien investiert. Eine Million Fahrzeuge würden im Jahr 2020 rund 2 % der Gesamtdeutschen Autoflotte entsprechen. Wenn diese Fahrzeuge dann komplett aus erneuerbaren Brennstoffe betrieben werden und sie völlig emissionsfrei Menschen und Güter transportieren, erst dann ist die Entwicklung positiv.

Unterstützt werden in diesem Programm:

- Reine Elektrofahrzeuge
- Kombinationen aus Elektro- und Verbrennungsantriebe
- Plug-in Hybride

Nach dem nationalen Entwicklungsplan der Bundesregierung wird aber von einer langjährigen Subvention der Elektrofahrzeuge abgesehen, das heißt die Technik muss sich in 10 Jahren soweit entwickelt und verbessert haben, dass sie konkurrenzfähige

Alternativen zu Verbrennungsmotoren bieten, mit allem was dazugehört.

Doch auch das Ausland bemüht sich den Anteil der „sauberen“ PKW zu erhöhen: Frankreich fördert beispielsweise in den kommenden 4 Jahren die Forschung und Entwicklung von alternativen Antrieben mit 400 Millionen Euro und erhofft sich dadurch eine Erhöhung des Elektroanteils an der Fahrzeugflotte auf 6 Prozent und 2 Millionen Fahrzeuge bis 2020; selbst China oder die USA investieren mehrere hunderte Millionen Dollar in deren Weiterentwicklung. Die chinesische Regierung peilt eine Quote von 5,5 % und 12 Millionen PKW im Jahr 2020 an.

Für den Vergleich zwischen Verbrennungs- und Elektromotor ist es am besten, wenn man den benötigten Treibstoff pro 100 km z.B. in Kilowattstunden ausdrückt. Nahrungsweise entspricht 1 l Diesel 10 kWh; bei Benzin ist es etwas weniger. Die durchschnittliche PKW-CO₂-Emission auf deutschen Straßen beträgt etwa 170 g CO₂/km, der von der EU angestrebte Mittelwert liegt bei 5 l oder 120 g CO₂/km (die genauen Werte liegen bei 2,33 kg CO₂/l Benzin) und bei 2,63 g CO₂ pro Liter Diesel). Gehen wir von einem Dieselfahrzeug mit 6,25 l Verbrauch und entsprechend 62,5 kWh aus, so verblieben bei einem Wirkungsgrad von 20% noch 12,5 kWh für den Antriebsstrang. Wollte man ein Elektroauto mit der gleichen Leistung bauen, so würde man bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 83% 15 kWh pro 100 km verbrauchen. Für die Stadt werden Autos mit niedrigerem Verbrauch gebaut, z. B. 10kWh/100km, was beim heutigen Strompreis von etwa 20 Cent, 2€/100 km entspräche. Auf der anderen Seite werden aber auch stärkere Elektroautos gebaut, wie die Modelle von TESLA mit einem durchschnittlichen Verbrauch von 30 kWh und mehr. Selbst ein Auto mit 30 kWh würde noch unter dem heutigen Flottenverbrauch in Deutschland liegen. Ein Elektroauto mit 20 kWh/100 km Verbrauch würde bei heutigem deutschen Strommix von 575 g CO₂/kWh den geforderten CO₂ Ausstoß von 120 g CO₂/kWh gerade noch unterschreiten.

Eine Modellrechnung zur CO₂-Einsparung ist in Tabelle 15 aufgeführt. Dort werden der City EL, der Tesla Roadster und ein Citroen Saxo électrique miteinander verglichen. Zur Berechnung der Emissionen dienen folgende Werte:

→Strommix Deutschland: 575 g CO₂/kWh

(<http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf>)

→Atomstrom: 32 g CO₂/kWh

→Erdgas: 428 g CO₂/kWh

→Steinkohle: 949 g CO₂/kWh

→Braunkohle: 1153 g CO₂/kWh

→Ökostrom: 40 g CO₂/kWh

(Quelle: <http://www.co2-emissionen-vergleichen.de/Stromerzeugung/CO2-Vergleich-Stromerzeugung.html>)

Tabelle 15: Verbrauch von verschiedenen Elektrofahrzeugen

Fahrzeugtyp	Verbrauch auf einen km in kWh	Stromart	Gramm CO ₂ pro erzeugte kWh	CO ₂ pro km	Einsparpotenzial zum 120 g/km Ziel der EU
Tesla Roadster www.teslamotors.com	0,3	Strommix	575	173	-53
		Atomstrom	32	10	110
		Erdgas	428	128	-8
		Steinkohle	949	284	-164
		Braunkohle	1.153	345	-225
		Ökostrom	40	12	108
City El www.smiles-world.de	0,09	Strommix	575	52	68
		Atomstrom	32	3	117
		Erdgas	428	39	81
		Steinkohle	949	85	35
		Braunkohle	1.153	103	17
		Ökostrom	40	4	116

Citroen Saxo électrique	0,2	Strommix	575	115	5
		Atomstrom	32	6	114
		Erdgas	428	85	35
		Steinkohle	949	190	-70
		Braunkohle	1.153	230	-110
		Ökostrom	40	8	112

Die Tabelle 15 zeigt dass, die Art des erzeugten Stromes sehr wichtig für die Klimaverträglichkeit von Elektrofahrzeugen ist. Beim derzeitigen Strommix (Stand 2009): In Deutschland würden alle aufgeführten Elektrofahrzeuge den aktuellen Durchschnittswert der deutschen Flotte unterschreiten. Die chinesische und amerikanische Stromerzeugung ist aufgrund vermehrten fossilen Einsatzes CO₂-intensiver, für China ist ein durchschnittlicher Wert von 1.000 g CO₂ pro kWh angegeben. Die umweltfreundlichste Stromerzeugung weist Norwegen auf, durch 98,5% Wasserkraft liegt der Durchschnitt bei 0,1 g CO₂ pro kWh (siehe AMV 8 auf der Anhang CD, sowie 8.1, Vergleich Elektro- und Kraftstoffautos).

Zur weiteren Übersicht und Vertiefung soll die folgende Abbildung dienen.

Es ist der Zusammenhang zwischen hypothetischer CO₂-Emission pro gefahrenen Kilometer gegen reale Emissionen durch die Stromerzeugung aufgetragen. Die blaue horizontale Linie stellt den durchschnittlichen CO₂-Ausstoß von Verbrennungsmotoren dar, dieser liegt momentan bei rund 180 g/km. Die rote Linie hingegen symbolisiert den von der EU geforderten Grenzwert von 120 g/km ab dem Jahr 2012. Nun wurden 5 unterschiedliche starke Elektrofahrzeuge untersucht und wie hoch die Emissionen bei verschiedener Stromerzeugung sind. Es ist zu erkennen, dass beispielsweise ein 20 kWh starker Motor maximal mit 600 g CO₂/kWh erzeugtem Strom fahren darf um das 120 Gramm Ziel nicht zu überschreiten, hingegen ein 30 kWh-Motor maximal mit 400 g CO₂ pro kWh.

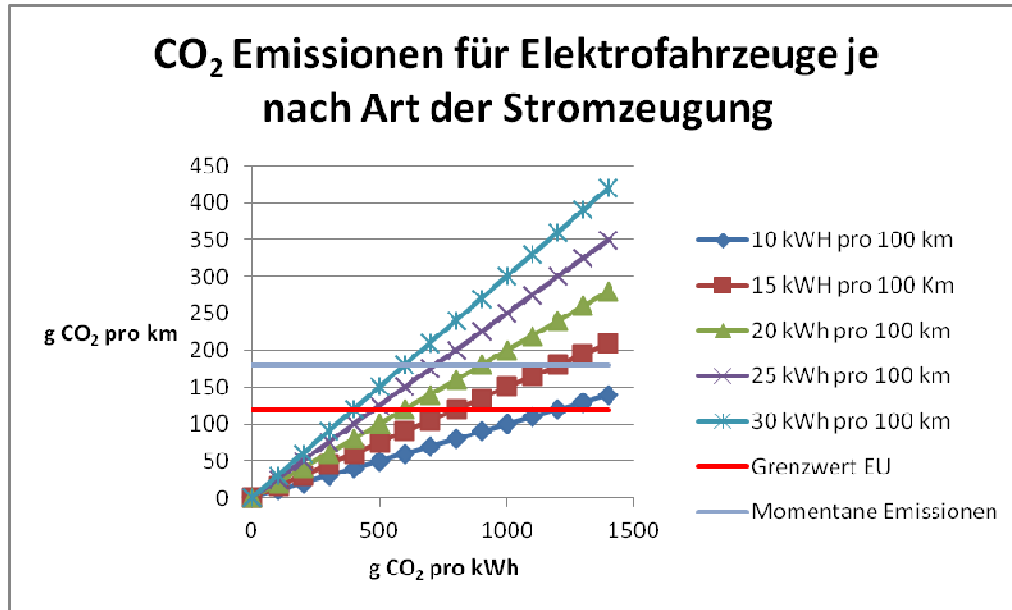


Abbildung 19: CO₂-Emissionen von Elektrofahrzeugen

Gegner der Elektromobilität rechnen gerne vor, dass durch erhöhte Elektrofahrzeuge der Strombedarf sehr stark ansteigen würde. Daher wird die Frage gestellt:

Welche Effekte hätte eine vollständige Elektrifizierung des individuellen Straßenverkehrs, wenn also sämtliche Verbrennungsmotoren durch Elektroantriebe oder Full Hybridsysteme ersetzt würden? Der dafür benötigte Strom würde erst einmal durch Atomstrom gedeckt, danach durch regenerative Energien. Dazu müsste natürlich eine Infrastruktur geschaffen werden, sowie eine Steigerung in der Reichweite und eine Verringerung der Anschaffungskosten erlangt werden. Bei einer Annahme von 45 Millionen deutschen PKW, einem durchschnittlichen Energiebedarf von 10 kWh und einer Fahrleistung von 12.000 km, würde der gesamtdeutsche Verbrauch von 596 Milliarden kWh um 11 Prozent ansteigen. Viele Kunden sind aber nicht überzeugt von Elektrofahrzeugen, da ihnen entweder die Reichweite zu gering ist oder sie an der Langlebigkeit der Batterie zweifeln. Es existieren Konzepte, indem Kunden ihre leere Batterie gegen eine aufgeladene eintauschen können oder indem für Batterien Zeitverträge abgeschlossen werden (vgl. www.betterplace.com). Zudem sollte Kunden die Möglichkeit gegeben werden, ihre Batterie in kurzen Haltephasen, beim Einkauf oder Arztbesuch effizient aufladen zu können.

Das Projekt „Modellregion Elektromobilität Rhein-Main“ sei an dieser Stelle erwähnt. Es ist mit 115 Millionen Euro betreutes Projekt des BMVBS und soll die Elektromobilität in Ballungsgebieten wie dem Rhein-Main Gebiet vorantreiben. Ziel ist es, mit regenerativen Energien und Elektromobilität eine Pionierrolle zu übernehmen indem Elektrobusse wie in die neue Buslinie zwischen Offenbach und Frankfurt, Hybridmüllfahrzeuge und Hybridschienenfahrzeuge eingesetzt werden. Ein weiterer Eckpunkt ist der Ausbau von Carsharing, die dem Kunden den Weg von Zuhause zum öffentlichen Verkehrsmittel oder Fernverkehr erleichtern sollen.

Untersuchungen zeigen, dass der Löwenanteil der Autofahrten nur über sehr kurze Strecken geht, wobei das Auto meist nur mit einer Person besetzt ist. Hier müsste ein Umdenken der Bevölkerung, hin zum kleinen wendigen und sparsamen Kleinfahrzeug stattfinden. Allerdings würde das zukünftige Kleinauto mit Verbrennungsmotor bei einem Verbrauch mit 2-3 Litern/100 km auch schon wesentlich weniger Abgase produzieren.

Der benötigte Strom kommt dabei aus biogen, solar, geothermisch oder fossil betriebenen Stromgeneratoren. Automobilhersteller setzen bei der Produktion vermehrt auf leichte Materialien, um die schweren Batterien im Gesamtgewicht zu kompensieren.

7 Weitere Transportsektoren

Bisher wurde nur der Straßenverkehr ausführlich diskutiert Daher werden in Kapitel 7 die drei wichtigsten Transportsektoren Schiff-, Flug- und Schienenverkehr neben dem Straßenverkehr kurz beschrieben und deren Entwicklung sowie deren Auswirkungen für das Klima begutachtet. An dieser Stelle sei noch einmal auf die QUANTIFY-Studie im Kapitel 4.5 verwiesen, dort werden ausführliche Aussagen über weitere Transportsektoren getroffen. Besonders Abbildungen 13 und 14, sowie Tabelle 9 zeigen die Entwicklung nach vier verschiedenen Szenarien bis ins Jahr 2100.

7.1 Schiffsverkehr

Dem internationalen Schiffsverkehr wurden 2008 bis zu 873 Millionen Tonnen CO₂ bzw. 2,7% der globalen CO₂-Emissionen zugesprochen. Darüber hinaus muss man noch 0,7% für lokalen Fischfang einrechnen. Die Größenordnung der Schiffsemissionen wurde jahrelang unterschätzt: so lagen die Angaben der IEA noch 2006 bei 583 Mt.CO₂ und können bis zu 1.085 Mt.CO₂ im Jahr 2050 ansteigen (vgl. IEA: *Transport, Energy and CO₂*, S.339). Die IMO (International Maritime Organization der UNO) hat den Anteil des Schiffsverkehrs auf 1120 Mt. CO₂ beziffert, emittiert von einer Flotte von 60.000 Schiffen (vgl. Hassellöv: *Umweltauswirkungen des Schiffsverkehrs*, S.12).

Im Schiffsverkehr sind aber auch besonders die NO_x, VOC, SO₂ und Feinstaubbelastungen für die Umwelt zu betrachten.

Die United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) hat den weltweiten Seehandel im Jahr 2009 mit 7,94 Milliarden Tonnen angegeben. Damit werden fast 80 % der weltweit transportierten Güter über die Meere absolviert.

Für den Schiffsverkehr gilt ähnliches wie für den Flugverkehr, Emissionen werden in Klimabilanzen noch nicht berücksichtigt bzw. einem Land zugeschrieben und der Treibstoffverbrauch erfreut sich massiver Steuererleichterungen.

In der Schifffahrt kommt hauptsächlich kostengünstiger Schiffsdiesel zum Einsatz, ein schwefelhaltiger Treibstoff der beim Verbrennen neben CO₂ und SO₂ zusätzlich viel NO_x emittiert.

Die in der Literatur angegebenen Wachstumsraten für den Schiffsverkehr schwanken zwischen 100% und 300 % in 2050 relativ zu 2005 (vgl. IEA: *Transport, Energy and CO₂*, S.341), je nach wirtschaftlicher Auftragslage und der Entwicklung von konkurrierenden Transportmedien wie beispielsweise Pipelines für Öl und Gastransporte.

Dem Hamburger Schiffsforscher Friedrich Mewis zufolge ist die effizienteste Spritsparmethode bei Schiffen die Reduktion der Geschwindigkeit. Würde man die übliche Geschwindigkeit von etwa 25,5 (rund 47 km/h) nur um wenige Knoten drosseln, würde man den Verbrauch und die Emissionen überdurchschnittlich

reduzieren können (vgl. http://www.dmkn.de/downloads/91/bf/i_file_50553/Optimierung_Schiffsgeschwindigkeit.pdf).

Ein modernes Kreuzfahrtschiff verbraucht pro Tag zwischen 50 und 100 Tonnen Schiffsdiesel, und angesichts der eingesetzten 30.000 bis 80.000 Leuchtkörper, wie Glühlampen, LEDs usw. sieht Dr. Hochhaus der TU Hamburg ein Einsparpotenzial von bis zu 2.000 Tonnen CO₂ pro Jahr.

Zudem existieren Ideen alternative Kraftstoffe in Schiffen einzusetzen; der Einsatz der Reedereien beim Umbau ist aber bis jetzt vernachlässigbar klein.

Weitere geplante Maßnahmen des IMO zur CO₂-Emissions Reduktion sind neben der oben erwähnten Gewichtsreduktion, der geänderten Energieversorgung an Bord und dem Einsatz neuer Antriebssysteme auch eine Optimierung der Schiffsbauweise und eine verbesserte Routenführung.

7.2 Bahnverkehr

Nach Angaben der Deutschen Bahn belaufen sich die CO₂-Emissionen auf 7 Millionen Tonnen (Angabe aus dem Jahr 2007) und haben somit einen Anteil von 3% bei den verkehrsbedingten deutschen Emissionen; weltweit sind es rund 2 % mit 125 Millionen Tonnen jährlich.

In Deutschland wurden im Jahr 2007 79 Milliarden Personenkilometer mit der Bahn zurückgelegt (vgl. DIW: Verkehr in Zahlen, Eisenbahnen, S.55); in der EU-15 345 und in der EU-27 lagen die Personenkilometer bei 395 Milliarden (vgl. Verkehr in Zahlen: Eisenbahnen, S.326); Dabei lag die Verkehrsleistung der Bahn im Jahr 2007 bei 296 Milliarden Tonnenkilometern für die EU-15-Staaten, und in der EU-27 bei 452 Mrd. tkm (vgl. Verkehr in Zahlen: Eisenbahnen, S.329).

Nach der *mobility-2030* Studie vom World Business Council for Sustainable Development WBCSD zeichnet sich der Bahnverkehr neben dem Luftverkehr durch die höchsten Zuwachsraten mit durchschnittlich 2,2 % pro Jahr im Zeitraum 2000-2050 sowohl im Passagieraufkommen wie auch im Frachttransport aus (vgl. WBCSD:

mobility 2030, S.31). Dies kann in urbanisierten Ländern zu regelrechten Platzproblemen führen, da ein Kilometer Bahnstrecke rund 1,2 Hektar Land für Schienen braucht, weiter wird für Wartungsarbeiten, Bahnhöfe oder Parkplätze zusätzlich Platz benötigt (Quelle: <http://www.allianz-pro-schiene.de/umwelt/flaechenverbrauch/>). Die Probleme der Bahnerweiterung sind nicht ganz unbekannt durch die jüngsten Ereignisse von Stuttgart-21 (<http://themen.t-online.de/news/stuttgart-21>)

Rund dreiviertel des benötigten Öls im Schienenverkehr fließt nach Indien, 10% sind für Europa bestimmt sowie für Amerika und Russland.

In Zukunft wird der Anteil des Schienenverkehrs im Passagier- sowie Frachttransport weiter ansteigen. Wenn der Strom für elektrisch betriebene Züge aus regenerativen Quellen stammt, ist diese Entwicklung als positiv zu betrachten. Vor allem in China besteht die Möglichkeit, große Strecken mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitszügen in kurzer Zeit umweltschonend zu bewerkstelligen, dazu müssen aber die Streckennetze vergrößert und die Anbindung an ländliche Gebiete verbessert werden und der Strom nachhaltiger bzw. der Dieseltreibstoff sauberer sein als bisher.

Das Transportieren von Menschen und Gütern mit der Bahn wird auch in Zukunft ein wichtiger Wirtschaftszweig sein. Die IEA beispielsweise erwartet in ihrem Bericht einen Anstieg im Frachtbetrieb von 20% bis zum Jahr 2050 (vgl. IEA: *Transport, Energy and CO₂*, S.270).

Im Moment kann die Deutsche Bahn preislich nicht mit den Billigfliegern im innerdeutschen Verkehr konkurrieren. Die Strecke Frankfurt-Hamburg (hin- und zurück) kostet bei der Bahn rund 220 Euro, mit Air Berlin zahlt man vergleichsweise knapp die Hälfte. Viele Pendler und Reisende wären bereit auf die Bahn umzusteigen, meist stimmt das Angebot nicht oder die räumliche Anbindung an den nächsten Bahnhof. Zudem sind vor allem spontane Buchungen bei der Bahn kostspielig und die Rückerstattungen gestalten sich schwierig.

7.3 Flugverkehr

Der internationale Flugverkehr expandiert seit langem und verzeichnet jährliche Zuwachsraten von über 3%, mit der Ausnahme des Krisenjahres 2008/09. Dennoch wird er bis jetzt nicht in den Emissionsbilanzen und Klimafolgenrechnungen berücksichtigt, weil hier bis jetzt auch hier wieder das Zurechnungsproblem zum Land besteht. Ähnlich dem Schiffsdiesel erfreut sich auch das Kerosin in der EU einer Steuerbefreiung. Nach Angaben des World Business Council for Sustainable Development in ihrem *mobility* Berichtes liegt der Treibstoffverbrauch der Luftfahrtbranche bei 12 % des Gesamtverbrauchs, soll aber auf einen Anteil von 18 % im Jahr 2050 steigen. (vgl. World Business Council for Sustainable Development: *Full Report 2004*, S.92).

Weltweit wurden 2006 2,1 Milliarden Menschen befördert, mit einer Gesamtleistung von 3.914 Mrd. Passagierkilometern (vgl. DLR: *Klimawirkungen des Luftverkehrs*, S.6); daraus ist ableitbar eine mittlere Distanz von etwa 1.860 km.

Dieser Abschnitt dient dazu, einen ersten Überblick über die Relevanz des Flugverkehrs für das Weltklima zu geben. Als erstes soll die Klimawirksamkeit von Flugzeugemissionen betrachtet werden; dazu dient eine Studie des deutschen Luft- und Raumfahrtinstitutes.

Nach Angaben des DLR wurden 2002 in der Luftfahrtbranche 176 Millionen Tonnen Kerosin verbraucht, was zu einem CO₂-Anteil von rund 2 % der globalen Emissionen führt (vgl. DLR: *Klimawirkungen des Luftverkehrs*, S.8). Zu beachten sind aber auch die so genannten Kondensstreifen (contrails) deren klimatische Wirkung aber noch relativ unerforscht ist. Ihnen wird ein positiver Effekt von 0,01 W/m² zugeschrieben; diese Annahme ist bisher wissenschaftlich nicht bestätigt.

Der IPCC-Bericht bilanzierte den Anteil des Luftverkehrs auf rund 3 % (0,05 W/m²) des gesamten anthropogenen Einflusses. Kohlenstoffdioxid ist auch Hauptbestandteil bei der Verbrennung von Kerosin und hat die größte Treibhausgaswirkung. Bei der Verbrennung von einer Tonne Kerosin werden 3,15 Tonnen CO₂ in die Atmosphäre

emittiert.

Auch die IATA (International Air Transport Association) ist sich ihrer Verantwortung bewusst, und hat in ihrem Jahresbericht von 2009 ebenfalls Stellung zum Klimaeinfluss genommen. Der IATA gehören 230 Fluggesellschaften an; dadurch kommt ihr ein großer Einfluss auf den internationalen Luftverkehr zu. Nach Angaben der IATA wurden 2008 durch Einsparprogramme, Leichtbauweise und den Einsatz von umweltfreundlicheren Treibstoffen 14,8 Millionen Tonnen CO₂ eingespart, durch höhere Effizienz und neue Technologien soll es sogar möglich sein, die Emissionen um weitere 20 bis 35% zu senken. Die IATA hat sich das Ziel gesetzt bis 2017 mindestens einen Anteil von 10 % an Biokraftstoffen einzusetzen (vgl. IATA: *Annual report 2009*, S.33)

Tabelle 16 zeigt, welche Luftverkehrsunternehmen alternative Kraftstoffe testen, und in welchem Umfang. Dabei ist anzumerken, dass jeweils nur ein Triebwerk mit einem maximalen Einsatz von 50% regenerative Energien getestet wurde. Ferner kann eine 747 problemlos auch mit drei Triebwerken fliegen, falls die Testturbine ausfallen sollte. Die ausgewählten Kraftstoffpflanzen dienen nicht dem Verzehr, wachsen auf Böden, die für die Ernährung ungeeignet sind und stehen somit in keiner Nahrungsmittelkonkurrenz.

Tabelle 16: Beispiele für alternative Kraftstoffe im Luftverkehr, nach IATA Annual report 2009 Seite 33

(Quelle: <http://www.iata.org/pressroom/Documents/IATAAnnualReport2009.pdf>)

Luftverkehrsgesellschaft	Flugzeugtyp	Testflug	Biokraftstoff	Beimischung
Virgin Atlantic	B747-400	23.02.08	Kokosnussöl und Babassuöl	20% in einem Triebwerk
Air New Zealand	B747-400	30.12.08	Jatropha	50% in einem Triebwerk
Continental Airlines	B737-800	7.01.09	Jatropha	50% in einem Triebwerk
JAL-Japan Airlines	B747-400	30.01.09	Jatropha und Leindotter	50 % in einem Triebwerk

Ferner werden weitere Möglichkeiten diskutiert, um die Treibstoffeffizienz zu erhöhen um damit Emissionen und Kosten zu senken:

1.) Flugstreckenverbesserung

Allein in Europa hatten unnötige Umwege im Luftverkehr einen Anteil von 5 Millionen Tonnen CO₂ zur Folge. Durch Optimierung des weltweiten Flugablaufes erhöht sich das Einsparpotenzial (vgl. DLR: *Klimawirkung des Luftverkehrs*, S.16))

2.) Besseres Flughafenmanagement

Nach Angaben der Lufthansa wurden im Jahr 2006 alleine durch Warten auf dem Rollfeld oder in Warteschleifen in der Luft 142.000 Tonnen Treibstoff extra verbraucht

(Quelle:<http://erlebnis-wissen.lufthansa.com/fileadmin/de/medien/4102M.pdf>).

Durch eine verbesserte Auslastung der Flughäfen und verkürzte Wartezeiten bei Start und Landung lassen sich hohe Mengen an Treibstoff sparen.

3.) Verwendung von leichteren Materialien

Gewichtsreduktion ist die effizienteste Methode um Kraftstoffe zu sparen.

4.) Neue Generation von Triebwerken

Durch Modernisierung von Triebwerken lässt sich der Treibstoffverbrauch um 15 % senken (vgl. DLR: *Klimaauswirkungen des Luftverkehrs*, S.14)

5.) Passagieranzahl pro Flug erhöhen

Die deutsche Lufthansa hat in ihren A 380 Maschinen Platz für 526 Passagiere (in einer drei Klassen Aufteilung), während die französische Airline Air Austral hat ihren A380 mit einer Einklassenbestuhlung und Platz für 840 Passagiere bestellt.

6.) Größere Auslastung einzelnen Flüge muss erhöht werden

Air France lässt momentan beispielsweise 4 tägliche Verbindungen zwischen Paris und Straßburg ausfallen, damit die Auslastungen auf den bestehenden Verbindungen höher werden.

Dass der Flugverkehr in Zukunft immer an Bedeutung gewinnen wird, liegt auf der Hand: Der europäische Flugzeugbauer Airbus beispielsweise prognostiziert in seinem Zukunftsbericht durchschnittliche Zuwachsraten im Passagieraufkommen von 4,7 % pro Jahr über die nächsten 20 Jahre (vgl. Airbus: *Flying smart-thinking big*, S.8). Ferner wird gezeigt, dass nach wie vor amerikanische Inlandsflüge rund 20 % des gesamten Flugverkehrs ausmachen: im Jahr 2009 waren es 900 Milliarden Passagierkilometer. Dieser Anteil wird zwar sinken, aber auch für die kommenden 20 Jahre der dominierte Teil sein. Allein Airbus erwartet eine Nachfrage von über 24.000 neuen Flugzeugen in 2028. Der Trend geht dabei zu immer größeren und energiesparenderen Flugzeugen. Momentan liegt der A380 mit 3,4 Litern Kerosin pro Passagier und 100 km bei einer vollen Auslastung von 555 Passagieren an der Spitze der umweltfreundlichen Flugzeuge.

Ähnliche Angaben über die weltweite Nachfrage von Passagierflugzeugen sind beim amerikanischen Hersteller Boeing nach zu lesen. Auch der neue Dreamliner (B787) soll dem A380 in nichts nachstehen.

Die Internationale Energieagentur (IEA) liefert dazu in ihrem Bericht aus 2009 eine aufschlussreiche Grafik: Auf dieser ist die Energieintensität gegen die Zeit aufgetragen und einzelne Flugzeugtypen eingezeichnet, die sich in ihrer Reichweite unterscheiden. Die Violette Markierung kennzeichnet Langstreckenflugzeuge wie den, A380, den B747 oder die DC 10. Hellblau hingegen sind Kurzstreckentypen wie der A320 oder die B737. Es ist ein klarer, stetiger Trend zu effizienten Flugzeugen zu erkennen, der in Zukunft im Airbus A350 gipfelt, dessen Erstausslieferung soll erst im Jahr 2013 erfolgen.

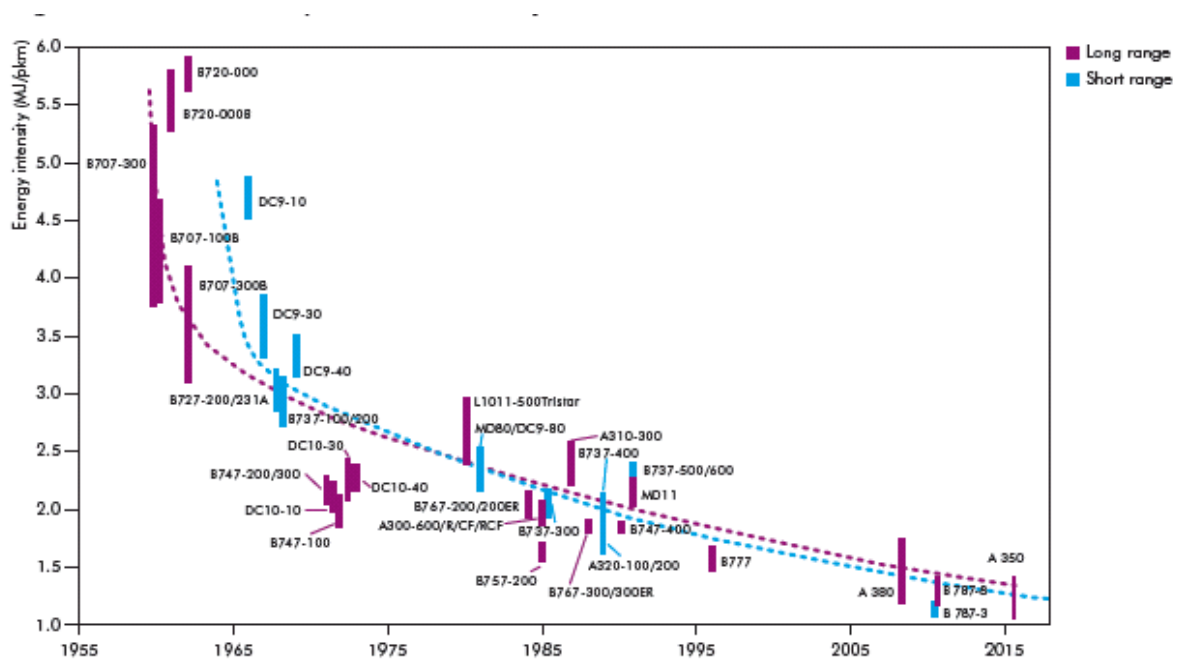


Abbildung 20: Energieintensität von Flugzeugen, IEA 2009, Seite 319

8 Transport der Zukunft

Dieses Kapitel soll einen Ausblick über den gesamten Personen- und Güterverkehr geben, sowie die damit verbundenen Auswirkungen auf Schadstoffausstoß und Klimawandel ansprechen. Die alleinige Effizienzsteigerung und Leichtbauweise werden den Anstieg auf zwei Milliarden Fahrzeuge weltweit im Jahr 2030 nicht kompensieren können; daher werden verschiedene Konzepte zusätzlich diskutiert.

1.) Fahrtraining

Es werden Seminare kostenfrei angeboten, die dem Fahrer vorausschauendes und energiesparendes Fahren vermitteln. Nach Angaben des Innenministeriums Baden-Württemberg lassen sich bis zu 30% Treibstoff durch einfache Techniken, wie unnötiges Bremsen, Fahren in hohen Gängen oder Vermeidung von unnötigem Gepäck einsparen (vgl. Innenministerium: *Energiesparend Fahren*, S.3)

2.) Einführung einer Busspur (*Fast lane*)

Um eine Verbesserung im öffentlichen Nahverkehr zu erreichen und um einen Vorteil gegenüber dem Individualverkehr zu haben, könnte eine separate Busspur eingeführt werden (teilweise gibt es in Deutschland schon solche Bus- und Taxi-Fahrspuren), die zügiges, konstantes Fahren begünstigt.

3.) Verlagerung des Güterverkehrs

Der Ferntransport von Gütern könnte in Zukunft komplett von der Straße auf die Schiene verlagert werden. Um einen nachhaltigen Transport zu gewährleisten, müsste das Stromnetz der Bahn mit regenerativer Energie gespeist werden.

Wenn alle transportierten Güter von der Straße, heute insgesamt 3.473 Millionen Tonnen (Statistische Bundesamt 2009), von der Straße auf die Schiene verlagert würden, entspräche dies allerdings einer Vervielfachung des Transportvolumens des

Schieneverkehrs um den Faktor 23. Die dementsprechende Erweiterung des Bahnnetzes ist nur zu erahnen.

4.) Fahrerassistenzsysteme

Intelligente Assistenzsysteme sollen in Zukunft dem Fahrer helfen, effizienter und sicherer zu fahren. Es wird über GPS mit Staumeldungen versorgt und gegebenenfalls umgeleitet. Zudem misst es den Abstand zum Vordermann und vermeidet dadurch unnötiges Beschleunigen und Bremsen und somit Energieverlust.

5.) Fahrverbote

Eine sehr einfache und kostengünstige Variante Energie zu sparen ist die Einrichtung eines Fahrverbotes bzw. eines verkehrsfreien Sonntages. Solche Maßnahmen sind aber bei Politikern und der Bevölkerung unbeliebt.

6.) Erhöhung des maximalen Transportvolumens

Momentan liegt das maximale Gesamtgewicht bei 44 Tonnen; technisch sind aber 60-Tonnen Sattelzüge keine Herausforderung. Dadurch ließen sich Fahrten einsparen, besonders wenn sich kleinere regionale Unternehmen zu Transportfahrgemeinschaften zusammenschließen würden.

7.) Ausbau des Bahnverkehrs

Gerade in urbanisierten Ländern und Ländern mit gegebener Infrastruktur ist an einen Ausbau des Schienennetzes zu denken. In Indien besteht bereits mit 62.000 Kilometern das größte Bahnnetz eines einzelnen Landes der Welt. Immerhin ist das Schienennetz der EU 27, also von 27 Staaten mit 218.000 Kilometer über 3-mal so groß. Mit neuen, leiseren, größeren und energiesparenden Zügen birgt dies ein enormes Potenzial.

8.) Pipelinetransport

Flüssige oder gasförmige Medien wie Benzin, Chemikalien, Erdgas aber auch Milch oder Trinkwasser, ließen sich durch ein optimiertes Netz von Pipelines schnell und

effizient transportieren. Gefährliche Güter müssten selbstverständlich gegenüber äußern Einflüssen wie Sabotage, Terror oder Korrosion geschützt werden. In der EU 25 bestehen 29.000 Kilometer Rohrfernleitungen mit einer Verkehrsleistung von 128 Milliarden tkm (vgl. Verkehr in Zahlen, S.319). Durch unterirdische Anlegung sind den Ausbaumöglichkeiten theoretisch keine Grenzen gesetzt.

9.) Erhöhung des Carsharing

Nach Angaben des Bundesverbandes Carsharing (BCS) ersetzt ein Carsharing-PKW im Durchschnitt die Fahrleistung von vier bis acht privaten PKWs. Durch den Ausbau der Flotte mit energiesparenden Kleinfahrzeugen und eventuelle finanzielle Anreize könnte der Anteil des Carsharings steigen (vgl. Bundesverband Carsharing: Mehr Mobilität mit weniger Autos, S.7). Ideal wäre ein Konzept, in dem jeder Kunde ein Fahrzeug an verschiedenen Sammelpunkten nutzen könnte und nach der Fahrt wieder zur Verfügung stellt. Ein Beispiel ist das Fahrradverleihkonzept in Barcelona und in weiteren europäischen Großstädten, bei dem sich die Einwohner kostenfrei anmelden können und sich an über 400 Stationen eines von 3.000 Fahrrädern ausleihen kann (<http://en.wikipedia.org/wiki/Bicing>).

10.) Deutsche Bahn

Deutsche Lokführer werden trainiert, Energie zu sparen, indem sie ihren Zug so lange wie möglich ausrollen lassen. Zudem wird die Bremsenergie zurückgewonnen. Laut der Deutschen Bahn wurden dadurch seit dem Jahr 2005 bis zu 310.000 Tonnen CO₂ eingespart

(vgl. http://www.deutschebahn.com/site/bahn/de/nachhaltigkeit/umwelt/klimaschutz/energiesparendes__fahren/energiesparendes__fahren.html).

9 Zusammenfassung

Wenn der rasante Klimawandel aufgehalten oder zumindest verlangsamt werden soll, muss auch dem Faktor „weltweiter Verkehr“ ein erhebliches Augenmerk eingeräumt werden. Die Masterarbeit konzentriert sich auf die Entwicklung des weltweiten Verkehrs in den nächsten 20 Jahren (2010-2030), sowohl in den Industrieländern (OECD-Länder) wie in den Entwicklungs- und Übergangsländern (Non-OECD-Länder), wo besonders in den BRIC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien und China sehr) große Veränderungen, gekoppelt mit starkem Wirtschaftswachstum, zu erwarten sind. Nach der Studie World Oil Outlook WOO der OPEC (2010) ist heute (2009) die Weltbevölkerung von 6,840 Millionen auf die Nicht-OECD-Länder (5,297 Mio.) und die OECD-Länder (1,543 Mio.) im Verhältnis 3,43/1 aufgeteilt. Im Jahr 2030 wird eine Weltbevölkerung von 8,332 Mio. Menschen erwartet mit der Aufteilung 6,711 Millionen in den Nicht-OECD-Ländern und 1,623 Mio. in den OECD-Ländern, entsprechend einem Verhältnis von 4,14/1. Die Weltfahrzeugflotte wird 2009 auf 1.003 Millionen abgeschätzt mit einem Anteil von 823 Millionen Personautos PKW und 180 Mio. Nutzfahrzeugen NFZ mit einem Verhältnis von PKW zu Gesamtfahrzeugen von 18%. Dabei ist die Zahl der Fahrzeuge in den Nicht-OECD-Ländern 323 Millionen und entsprechend 680 Millionen in den OECD-Ländern. Die Weltautomobilproduktion betrug 2008 70,8 Millionen Fahrzeuge (59.1 Mio. PKW und 11.7 Mio. NFZ), im Krisenjahr 2009 war sie auf 62 Millionen abgeschwächt. Deutschland war zusammen mit den Vereinigten Staaten und Japan lange Zeit zahlenmäßig führend im Automobilbau, heute steht es an 4. Stelle hinter China. Die Weltautomobilproduktion deutscher Hersteller betrug 12 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2008 (10,4 Mio. Fahrzeuge in 2009) mit fast gleichen Anteilen im Inland (6 Mio. in 2008) und Ausland (ebenfalls 6 Mio.), entsprechend einem Anteil von 17,4% (VDA, Verband Deutscher Automobilhersteller, 2010). Deutsche Automobilhersteller wie Daimler, BMW, Volkswagen und Audi sind besonders stark im Premium-Sektor vertreten bezüglich Prestige, Komfort und Leistung, im besonderen was die Dieselseltechnologie betrifft; sie sind aber bis jetzt fast kaum auf dem Hybrid- und Elektroautosektor nach

außen für den Kunden sichtbar, d.h. von entsprechenden Modellen (wie z.B. Elektro-Mini von BMW oder Elektro-Smart von Daimler) sind außer Prototypen noch nicht auf dem Markt. Technische Innovationen dienen derzeit fast immer noch zur Verbesserung des Komforts und zur Vergrößerung des Fahrspaßes durch höhere Leistung, mehr Platz, oder den Einbau von beispielsweise Klimaanlage, was sich in einem höheren Gesamtgewicht und dadurch erhöhten Energiebedarf niederschlägt. Wenn eine Klimakatastrophe vermieden will, muss sich das entsprechende Angebot der Automobilhersteller für moderne Autos mit Hybridtechnik und Elektroautos mit Range-Extender ganz wesentlich verändern.

Nach der Meinung mehrerer renommierter Autoren wird die weltweite Fahrzeugflotte von heute (2010) von 1,03 Milliarden (davon 840 Millionen PKW) in den nächsten zwanzig Jahren auf 1,84 (davon 1,45 Mia. PKW nach WOO 2010 OPEC) bis 2,08 Milliarden (keine Unterscheidung in PKW und NFZ bei Dargay et al.) in 2030 ansteigen. WOO-2010 differenziert den Weltfahrzeugbestand im Jahr 2030 nach OECD-Ländern mit 704 Mio. PKW und 133 Mio. NFZ und Nicht-OECD Ländern mit 748 Mio. PKW und 257 Mio. NFZ, wobei deutlich erkennbar ist, dass die Nicht-OECD-Länder in beiden Sektoren die OECD-Länder übertreffen werden.

Wenn diese Fahrzeuge nach wie vor mit fossilen Brennstoffen angetrieben werden sollten, dann wäre dies kontraproduktiv für eine mögliche Transportrevolution. Nach Angaben der IEA liegt die jährliche Emission von CO₂ im Jahr 2030 in deren Referenzszenario, das schon jährliche Innovationen im Verkehr mitberücksichtigt, bei 9,2 Gt CO₂. Dies entspricht 23% der Gesamtemissionen von 40,2 Gt CO₂. Im Ökoszenario von 450 ppm CO₂eq liegt der verkehrsbedingte CO₂-Ausstoß bei 7,65 Gigatonnen CO₂, entsprechend sind dies 29% der Gesamtemission von 26,4 Gt CO₂. Die amerikanische Behörde Energy Information Agency EIA beschränkt die Emissionen (für 2030) auf 7,1 Gigatonnen CO₂, um das 450 ppm Ziel nicht zu gefährden.

In den oben diskutierten Hochrechnungen der QUANTIFY-Studie der EU werden noch die Szenarien des Second Report on Emission Scenarios SRES (A1F, A1B, A1T, B1, A2 und B2) verwendet. Hier werden die CO₂-Emissionen im Jahr 2030 vom Verkehrssektor

je nach Szenario zwischen 12,8 Gt CO₂ (A1B-Szenario) und 8,9 Gt CO₂ (B1) liegen. Der Straßenverkehr hat dabei immer noch den Löwenanteil und weist dabei eine Spannweite von 9,8 Gt (A1B) und 6,8 Gt (B1) auf. Nach dem A1B Szenario emittiert jedes Fahrzeug (gewichteter Mittelwert von PKW und NFZ) weltweit heute 5,5 Tonnen CO₂ pro Jahr (Siehe Abbildung 12, Seite 65, 1 Milliarde Fahrzeuge emittiert 5,5 Milliarden Tonnen CO₂). Bei einer Verdopplung der Fahrzeugflotte auf 2 Milliarden in 2030 müssten für das A1B-Szenario mit insgesamt 9,8 Milliarden Tonnen CO₂ Emission jedes Fahrzeug 4,9 Tonnen CO₂ ausstoßen, was einer Effizienzverbesserung in 20 Jahren von 11% entspricht. Für das Ökologieszenario B1 mit angenommener gleicher Fahrzeugzahl von 2 Milliarden, wäre bei einer Gesamtemission von 6,8 Milliarden Tonnen CO₂ ein mittlerer Verbrauch von 3,4 Tonnen CO₂ pro Fahrzeug zu fordern, was einer Reduktion von 38% in 20 Jahren gleichkäme.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag auf dem Straßenverkehr, zu dem sowohl zum überwiegenden Anteil der private Personenverkehr im eigenen PKW wie auch der Verkehr der Nutzfahrzeuge zählt, die als Busse Personen und als LKW Güter transportieren. Die Arbeit wurde abgerundet durch eine Analyse der übrigen Transportsektoren, zu denen der Schienenverkehr der Bahn (wiederum Personen- und Güterverkehr), der Binnenschiffverkehrsverkehr, der Überseeschiffsverkehr, der Transport durch Pipelines, und der Flugverkehr gehört. In dem EU-Projekt QUANTIFY wurde ein Vergleich dieser Sektoren (außer Pipelines) mit dem Straßenverkehr weltweit bezüglich der CO₂-Emission für die Szenarien A1B und B1 untersucht, die in den Abbildungen 13 und 14 im Abschnitt 4.5 QUANTIFY wiedergegeben sind. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass im Jahr 2010 (im wesentlichen global durch A1B geprägt) die CO₂ Emission des Straßenverkehrs 5.555 Gt CO₂ beträgt, während der zweitgrößte Sektor der Flugverkehr mit 868 Mt CO₂ zu Buche schlägt, fast gleich auf mit Flugverkehr ist die Überseeschiffahrt mit 801 Mt CO₂, die Bahn folgt abgeschlagen mit nur 116 Mt CO₂, an letzter Stelle steht die Binnenschiffverkehrsverkehr mit 33 Mt CO₂. Für die Entwicklung in 2030 steht an erster Stelle wiederum der Straßenverkehr mit A1B: 9.860 Mt (B1: 6.631 Mt), der Flugverkehr mit A1B: 1.474 Mt (B1: 1.062 Mt), die Überseeschiffahrt mit A1B: 1.393 Mt CO₂ (B1: 976 Mt), die Bahn mit A1B: 162 Mt (B1: 104 Mt), und schließlich Binnenschiffahrt mit A1B: 31 Mt (B1: 26

Mt). Würde man die Periode 2010 bis 2030 durch eine Exponentialfunktion wiedergeben, so ist bezüglich des jährlichen CO₂-Anstiegs ein Wachstum von $\ln(9860/5555)/20$ gleich 2,9% für den Straßenverkehr und 2,6% für den Flugverkehr unter A1B zu errechnen. Die Überseeschifffahrt ist fast gleichauf mit dem Flugverkehr, auffallend ist der geringe CO₂-Ausstoß der Bahn, in absoluten Zahlen wie auch im Anstieg mit 1,7%.

Auch ein Ausbau von öffentlichen Verkehrsmittel wird das Wachstum der PKW nicht aufhalten, denn Mobilität ist ein Stück persönliche Freiheit: durch das Auto lassen sich Fahrzeit, Ziel, Geschwindigkeit und Strecke selbst gestalten. In Deutschland legte jeder Bürger im Jahr 2000 durchschnittlich 14.700 Kilometer zurück, entsprechend 1.213 Milliarden Pkm bei 82,5 Millionen Einwohnern. Davon wurden alleine durchschnittlich 10.352 Kilometer (rund 70,4 %) durch den PKW absolviert (Durchschnitt der EU-15 bei 10.111 Km), 921 km mit dem Bus, 861 km mit der Bahn, 1.503 km mit dem Flugzeug, 182 km mit der S- und U-Bahn, 218 km mit Motorrad und Moped, 291 km mit dem Fahrrad und 376 km zu Fuß .Bei gleich bleibender Verkehrsleistung würde eine Reduktion des PKW-Anteils auf 50 % schon enorme Auswirkungen zeigen (vgl. AMV 9, Struktur des Verkehrs im Anhang)

In der Studie von Dargay, Gately und Sommer: " Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030", die 2007 im Energy Journal erschien, wurden zunächst 45 Länder historisch von 1960 bis 2002 bezüglich des Bruttoinlandsproduktes pro Kopf (GDP/cap) und Zahl der Fahrzeuge/ 1.000 Einwohner (veh/1.000) in einer Gompertz-Funktion (S-förmiger asymptotischer Verlauf mit 3 Parametern) korreliert und daraus die Entwicklung bis 2030 abgeleitet. Die vorgelegte Masterarbeit Umweltwissenschaften ist vom Schwerpunkt her naturwissenschaftlich orientiert, kann aber bei Fragen der Klimaänderung, des Klimaimpakts und der Abmilderung der Klimaveränderung (mitigation) nicht vollständig auf den ökonomischen Hintergrund verzichten. In einer globalen Studie wie sie hier in der Arbeit angelegt ist, hat immer wieder verwundert, wie positiv die ökonomische Fachwelt (Weltbank, Internationaler Währungsfond IMF (International Monetary Fund)) gegenüber einem weltweiten, wenn auch differenzierten Wachstum über nächsten 20 Jahre, über die nächsten 40 ,

ja über die nächsten 90 Jahre bis zur Jahrhundertwende 2100 (SRES) eingestellt ist. So steigt das reale Pro-Kopf Einkommen, nach der World Business Council for Sustainable Development WBCSD (2004), für OECD Nordamerika, OECD Pazifik und OECD Europa von 19.000-26.000 US\$ in 2000 auf 45.000 bis 58.000 US\$ in 2050, für China von 5.000 US\$ bis 28.000 US\$ in 2050, und für den Weltdurchschnitt von 7.000 auf 17.000 US\$. Die globalen Zahlen für Länder sehen nicht viel anders aus, hier steht einem globalen wirtschaftlichen Wachstum von 3% zwischen 2000 bis 2030 nur ein Bevölkerungswachstum von jährlich 1% gegenüber, das einen kleineren Teil des Wirtschaftswachstums verzehrt. Mit dem projizierten Wirtschaftswachstum ist auch nur die rasante Entwicklung des Straßen- und Flugverkehrs mit 3-3,5 % verständlich. Aber gerade bei Wirtschaftswachstum bleibt auch die Hoffnung, dass mit der Vernunft der Wissenschaft, mit dem technischen Fortschritt und mit dem Willen der Bevölkerung und der Politik finanzielle Mittel verfügbar werden, die einen Umwelt- und Klimaschutz bezahlbar machen. Das heutige Bruttoinlandsprodukt aller Staaten beträgt (2009) 58 Billionen US \$. Sollte 1% des Bruttoinlandsproduktes (1% von den 3%, die jährlich real hinzukommen) entsprechend 580 Milliarden für Klimaschutz pro Jahr in den nächsten 20 Jahren allein von den OECD-Ländern mit einer Bevölkerung von 1,54 Milliarden aufgebracht werden, dann entspräche dies einem Betrag von rund 400 US\$/ (Kopf*Jahr) , bzw. 6 Euro pro Kopf und Woche (4 Euro/Woche nach Interview von Lord Stern und Ottmar Edenhofer anlässlich der Kopenhagen-Konferenz (Nov. 2009). Die Internationale Energieagentur IEA (Special Early Excerpt WEO 2009 for Copenhagen,) schätzt einen notwendigen Betrag von 12.100 Milliarden US\$-2008 für den Zeitraum der nächsten 20 Jahre ab oder 600 Milliarden US\$-2008/Jahr, also ähnlich wie oben. Die finanziellen Mittel sollen für Effizienzverbesserungen in Kraftwerken und Energieendnutzung (63%), erneuerbare Energien (23%), Biotreibstoffe (3,3%), Kernenergie (5,1%) und Carbon-Sequestration-und-Storage CCS-Technologien (5,8%) bereitgestellt werden. Speziell bezüglich des Verkehrs existieren zukunftsfähige Modelle wie Elektrofahrzeuge, Brennstoffzelle, Effizienzsteigerung im Verbrennungsmotor und der Ausbau der regenerativen Kraftstoffe, sowie eine Verbesserung des öffentlichen Personen Nah- und Fernverkehrs.

Es ist immer wieder von China und Indien zu lesen, dass diesen Ländern zweifelsohne eine Schlüsselrolle zukommt. Nach der Studie GAINS soll China in 2030 zusammen 724 Millionen Fahrzeuge besitzen, was einem globalen Anteil von 36% entspräche. Heute gibt es in China etwa 76 Mio. Fahrzeuge mit einer mittleren jährlichen Wachstumsrate von 10%, oder einer Verdopplungsrate von 7 Jahren, hochgerechnet ohne Einschränkung durch die Umwelt, sind dies 200 Millionen im Jahr 2020, und 560 Millionen in 2030. Bei einem etwa 3,5-prozentigen Wachstum der Automobilflotte von 1 auf 2 Milliarden (siehe auch Two billion Cars Driving towards Sustainability, D. Sperling Und D. Gordon) ist es zwingend notwendig, dass sich auch die Automobilproduktion von heute 70 Millionen Fahrzeuge auf 140 Millionen Fahrzeuge erhöht. In den Entwicklungsländern werden diese Fahrzeuge zum größten Teil neu eingesetzt und die Flotte entspricht im Wesentlichen dann dem neuen Standard, in den Industrieländern dienen sie vorwiegend zum Austausch alter Fahrzeuge, wobei in einem Jahr jeweils nur ein Zehntel bis ein Fünftel ausgetauscht wird, das heißt der neue Standard setzt wesentlich zeitverzögert durch. Deshalb wäre es so wichtig, dass gerade neben dem Absatz der Premium-Klasse (Audi und, BMW und Daimler laufen hervorragend) in den Entwicklungsländern auch ein Exportauto im mittleren und unteren Preissegment entworfen und gebaut wird, das trotzdem den bestmöglichen Umweltstandards entspricht.

Zu den erwähnten Klimaproblemen stellen zwei Milliarden Fahrzeuge in 2030 ein Platzproblem dar, das sich natürlich zunächst auf dem völlig unzureichenden Straßennetzausbau äußert, der sich besonders in den urbanen Ballungsräumen verschärfen wird. Hinzu kommt noch das Platzproblem beim Parken. Ein VW Polo 4 beispielsweise hat eine auf die Straße projizierte Fläche (Länge*Breite) von 6,47 m²; nimmt man eine Anzahl von weltweit 1,3 Milliarden VW Polos im Jahr 2030 an, würden diese eine Oberfläche von 8.400 km², also ca. ein Fünftel der Fläche der Schweiz einnehmen (Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/VW_Polo_IV). Wenn man mit einem Gittermuster xy rechnet, bei dem jeweils ein Platz bzw. zwei Plätze nach oben und ein Platz bzw. 2 Plätze nach rechts frei gehalten wird, um den geringstmöglichen Verkehrsfluss zu symbolisieren, dann erhöht sich die benötigte Fläche um den Faktor 4

bzw. 9 entsprechend auf 75.600 km² und man gelangt fast zu der Fläche von Tschechien (78.864 km²).

Abschließend kann folgendes Fazit gezogen werden: Um die Gesamtproblematik von Verkehr, CO₂-Emission und Klimaänderung zu lösen sind nicht nur die Politik, die Lobbyisten und die Fahrzeughersteller gefordert; vielmehr ist auch ein Umdenken der Gesellschaft dringend erforderlich. Dies bedeutet, dass jeder einzelne Mensch sich über seine Mobilität bewusst werden und von dem Gedanken abkommen muss: „ Meine eigene Lebensqualität wird nicht durch mein Auto reduziert, sondern durch das der Anderen.“

Ein besserer Ansatz wäre der kategorische Imperativ, „Handle nur nach derjenigen Maxime, durch die du zugleich wollen kannst, dass sie ein allgemeines Gesetz werde.“
(Immanuel Kant)

Literaturverzeichnis mit Internetzitenen

Airbus , Global market forecast 2009-2028, 2009

(<http://www.airbus.com/en/corporate/gmf2009/>)

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen E.V., Energieflussbild 2009

<http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=6409>

BMVBS, Bundesministerium für Verkehr, Bau, und Stadtentwicklung, Szenarien zur Mobilitätsentwicklung unter Berücksichtigung der Siedlungsstrukturen bis 2050, 2006

(<http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/31892/publicationFile/644/mobilitaetsentwicklung-2050.pdf>)

BMVBS zusammen mit DIW, Deutschem Institut für Wirtschaftsforschung, Verkehr in Zahlen 2009/10

BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Energiedaten, Nationale und Internationale Entwicklung

<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/energie-daten-gesamt,property=blob,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.xls>

Boeing, Current Market Outlook (2010) pp. 2010-2029

(http://www.boeing.com/commercial/cmo/pdf/Boeing_Current_Market_Outlook_2010_to_2029.pdf)

Bosch, Hybridantriebe, Brennstoffzellen und alternative Kraftstoffe, 2008, Herausgeber Robert Bosch GmbH Postfach 112973201 Plochingen

Bundesverband CarSharing E.V., Klimaschutz durch CarSharing, 2008

http://www.carsharing.de/images/stories/pdf_dateien/klimaschutzbroschuere_endversion.pdf)

Dargay, Joyce and Dermot Gately, Income's effect on car and vehicle ownership, 1997 Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 33, Issue 2, 1999, Pages 101-138

Dargay, Joyce, Dermot Gately and Martin Sommer, Vehicle ownership and income growth 1960-2030, Energy Journal, 2007, 28(4), pp. 163-190.

DOE, Department of Energy, International Energy Outlook, 2010

([http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2010\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2010).pdf))

DOE, Department of Energy, Transportation Energy Data Book, 2009

(http://cta.ornl.gov/data/tedb29/Edition29_Full_Doc.pdf)

DLR, Klimawirkungen des Luftverkehrs, 2007

http://www.dlr.de/pa/Portaldata/33/Resources/dokumente/ceas/Klimawirkungen_de_s_Luftverkehrs_DLR_0907_DE.pdf)

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Verkehr in Zahlen 2009

ESSP, The Global Carbon Project 2009

(<http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/09/hl-full.htm#ffcement>)

Germanwatch, Die Welt am Scheideweg, 2008, Rowohlt Verlag

Germanwatch, Welche Energie-Zukunft ist möglich?

(www.germanwatch.org/klima/nes.pdf)

Hassellöv, Ida-Maja, Die Umweltauswirkungen Schiffverkehrs, 2008

(http://www2.michael-cramer.de/uploads/die_umweltauswirkungen_des_schiffsverkehrs.pdf)

Hennike, Peter und Manfred Fishedick, Erneuerbare Energien, 2010, Beck Verlag

IATA, Annual report, 2009

(<http://www.iata.org/pressroom/Documents/IATAAnnualReport2009.pdf>)

IEA, international Energy Agency, How the energy sector can deliver on a climate agreement in Copenhagen, 2009

(http://www.iea.org/weo/docs/weo2009/climate_change_excerpt.pdf)

IEA, Transport, Energy and CO₂, 2009

IEA, World Energy Outlook 2008, 2008

(<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/weo2008.pdf>)

IMF, International Monetary Fund, World economic outlook, 2010

(<http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2010/01/pdf/text.pdf>)

IMO, International Maritime Organisation, IMO and the environment, 2009

(http://www5.imo.org/SharePoint/blastDataOnly.asp/data_id=26878/IMOandtheEnvironment2009.pdf.pdf)

Innenministerium Baden-Württemberg, Energiesparend Fahren, 2008

International Transport Forum, Reducing transport greenhouse gas emissions, 2010

(<http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/10GHGTrends.pdf>)

International Transport Forum, Transportation Outlook, 2010

(<http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/10Outlook.pdf>)

IPPC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Weltklimarat, Assesment Report 4, 2007

(http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf)

JAMA, Motor Vehicle statistics in Japan, 2009

(<http://www.jama-english.jp/publications/MVS2010.pdf>)

JAMA, Reducing CO₂-Emissions in the global transport sector, 2008,

(http://www.jama-english.jp/publications/2008_CO2_RoadTransport.pdf)

Kraftfahrzeugbundesamt, Fahrzeugklassen und Aufbauarten 1955-2010

http://www.kba.de/cln_005/nn_191172/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/b_fzkl__zeitreihe.html

Le Quéré Corinne, Raupach MR, Canadell JG, Marland G et al. (2009) Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. Nature Geoscience (2009) 2, 831-836

<http://www.nature.com/ngeo/journal/v2/n12/full/ngeo689.html>

National Hydrogen Association, The Energy Evolution, 2009

(<http://www.hydrogenassociation.org/general/taskForce/evolutionReport.pdf>)

OICA, International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, CO₂ in the transport sector, 2010

(<http://oica.net/wp-content/uploads/climate-change-and-co2-brochure.pdf>)

OPEC, World Oil Outlook, 2008, 2009 und 2010

(http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/WOO_2010.pdf)

Rüüd, Kurt, Quo vadis Auto?, 2008, Books on demand

Shell, Flexibilität bestimmt Motorisierung, 2004

(http://daten.clearingstelle-verkehr.de/217/01/24_shell_pkw_studie_2004.pdf)

Shell, Shell LKW-Studie bis 2030,2010

(http://www-static.shell.com/static/deu/downloads/aboutshell/our_strategy/truck_study/shell_truck_study_2030.pdf)

Spiegel Special, Neue Energien, 2007

Sperling, Daniel und Deborah Gordon (2009) Two billion cars, Driving towards sustainability Oxford University Press

Statistisches Bundesamt Deutschland, DESTATIS, Verkehrsleistung 2009

(<http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Verkehr/Gueterbefoerderung/Tabellen/Content75/Gueterbefoerderung,tempLatelId=renderPrint.psmI>)

UBA, Umweltbundesamt (2007) Die CO₂ Bilanz des Bürger, in Zusammenarbeit mit dem IFEU, Institut für Energie und Umweltforschung, Heidelberg

UNCTAD, UN Conference on Trade and Development, Review of maritime transport 2010

(http://www.unctad.org/en/docs/rmt2010_en.pdf)

UPI Umwelt und Prognoseinstitut, Heidelberg; Folgen einer globalen Massenmotorisierung, 1995

VDA, Verband der Automobilindustrie, Jahresberichte, 2004-2010

(<http://www.vda.de/de/publikationen/jahresberichte/index.html>)

World Business Council for sustainable development, Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability, 2004

(<http://www.wbcsd.org/web/publications/mobility/mobility-full.pdf>)

World Resource Institute, Changing Drivers, 2003

(http://pdf.wri.org/changing_drivers_full_report.pdf)

Wuppertal Institut, Klimawirksame Emissionen des PKW-Verkehrs, 2006

(http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/ws34.pdf)

WWF/Prognos Institut, Modell Deutschland Klimaschutz bis 2050, 2009

(<http://www.oeko.de/oekodoc/948/2009-054-de.pdf>)

Zusätzliche Information zu 5 großen Studien, die eine Grundlage für die Masterarbeit bildeten, nämlich:

1. der QUANTIFY-Studie unter Projektleitung des DLR Oberpfaffenhofen, Projektpartner Dr. Klaus Gierens und Prof. Dr. Robert Sausen
2. der GAINS-Studie unter Projektleitung des IIASA-Instituts, Laxenburg, Österreich, Projektpartner Dr. Jens Borken-Kleefeld
3. der Fahrzeugprognose von Dargay, Gately und Sommer, Projektpartnerin Joyce Dargay, University of Leeds, England
4. des Weltenenergiemodells der Internationalen Energieagentur IEA, Paris, Projektpartner Paweł Olejarnik
5. der Global Carbon Budget-Studie, Projektpartner und CO₂

-Projektleitung Dr. Michael Raupach CSIRO, Canberra Australien

zu 1) Prof. Dr. Robert Sausen, DLR-Institut für Physik der Atmosphäre,

Oberpfaffenhofen, 82234 Wessling, Steering Committee

Sausen, R. and V. Eyring, 2006: QUANTIFY: Quantifying the Climate Impact of Global and European Transport Systems. Fifth Community Aeronautical Days 2006, Vienna, Austria, 2006-06-19.

Sausen, R., 2006; Quantifying the Climate Impact of Global and European Transport Systems: An Overview of the Project QUANTIFY after 18 Months (invited). 6th Annual Meeting of the European Meteorological Society and 6th European Conference on Applied Climatology, Ljubljana, Slovenia, 4 – 8 September 2006.

Sausen, R., 2007: Auswirkungen des globalen Luftverkehrs auf die Klimaentwicklung – eine Einschätzung. Wettbewerbsfähigkeit und Umweltstandards im Luftverkehr – Zum Sachstand nationaler und europäischer Planungen, Berliner Forum Zukunft, DGAP, Berlin, 15. März 2007.

Sausen, R. 2008: Fliegen wir das Klima zugrunde? In Conference "Städte und Flughäfen - Miteinander oder Gegeneinander?", 2008-05-30, Berlin, Germany, ILA.

Borken, J., Bei, X., Jiang, Y., Meretei, T. 2008: Road transportation in China: How big are fuel consumption and pollutant emissions? Transportation Research Board, 87th Annual Meeting, CD Compendium of Paper (paper 08-0578), 13-17 Jan. 2008, Washington DC/USA.

Borken-Kleefeld, J., T. Berntsen, J. Fuglestvedt, 2010: Specific Climate Impact of Passenger and Freight Transport. Environ. Sci. Technol., <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es9039693>

Gierens, K., L. Lim, K. Eleftheratos, 2008: A review of various strategies for contrail avoidance. The Open Atmospheric Science Journal, 2, 1-7. (<http://www.bentham-open.org/pages/gen.php?file=1TOASCJ.pdf>)

Gierens, K., B. Kärcher, H. Mannstein, B. Mayer, 2009: Aerodynamic contrails: Phenomenology and flow physics. J. Atmos. Sci., 66, 217-226.

Zu 2) GAINS-Studie: POTENTIALS AND COSTS FOR GREENHOUSE GAS MITIGATION IN ANNEX I COUNTRIES INITIAL RESULTS (Version 2 July 2009)

Amann, Markus, Imrich Bertok, Jens Borken, Janusz Cofala, Chris Heyes, Lena Hoglund, Zbigniew Klimont, Pallav Purohit, Peter Rafaj, Wolfgang Schöpp, Geza Toth, Fabian Wagner, Wilfried Winiwarter

<http://gains.iiasa.ac.at/gains/reports/AnnexI-results.pdf>

<http://gains.iiasa.ac.at/index.php/home-page/241-on-line-access-to-gains>

Specific Climate Impact of Passenger and Freight Transport

Jens Borken-Kleefeld, Terje Bernsten und Jan Fuglestvedt. Environmental Science and Technology 2010, Vorveröffentlichung, noch keine Seitenzahl.

Zu 3) Dargay, Joyce and Dermot Gately, Income's effect on car and vehicle ownership, 1997 Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 33, Issue 2, 1999, Pages 101-138

Dargay, Joyce, Dermot Gately and Martin Sommer, Vehicle ownership and income growth 1960-2030, Energy Journal, 2007, 28(4), pp. 163-190.

Wird in fast allen globalen Studien zu Grunde gelegt, auch jenen der IEA

Zu 4) IEA World Energy Outlook 2009, eine kostenfreie Papierversion wurde von der IEA durch IEA Chief Economist, Dr. Fatih, Birol für die Masterarbeit zur Verfügung gestellt. Das Weltenergiemodell wird beschrieben http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2010/World_Energy_Model.pdf

Zu 5) Le Quéré Corinne, Raupach MR, Canadell JG, Marland G et al. (2009) Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. Nature Geoscience (2009) 2, 831-836. <http://www.nature.com/ngeo/journal/v2/n12/full/ngeo689.html>

Davis S, Caldeira K (2010) Consumption-based accounting of CO2 emissions. PNAS 107: 5687-5692. <http://www.pnas.org/content/107/12/5687>

Carbon Dioxide Information Analyses Center (CDIAC). http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.html

Canadell JG et al. (2007) Contributions to accelerating atmospheric CO2 growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. PNAS 104: 18866–18870, <http://www.pnas.org/content/104/47/18866.abstract>

Anhang

Aufgrund der Datenmenge wurden sämtliche Anhänge auf einer separaten CD gebrannt. Die Aufteilung soll an dieser Stelle kurz erläutert werden.

Im Ordner **ALI**, Anhang Literatur befinden sich alle relevanten und zitierten Studien.

Im Order **AMK** „Modellierung Klima“ werden Rechnungen präsentiert die sich mit der Klimawirkung von CO₂ beschäftigen. AMK 1 und 2 haben direkte Verweise in der Arbeit, AMK 3 bis 10 dienen dem weiteren Interesse und Verständnis.

Der Anhang **AMV** „Modellierung Verkehr“ dient dazu Hochrechnungen und Daten darzustellen, die die Struktur des Verkehrs in näherer Zukunft widerspiegeln.

Alle aufgeführten Dateien werden in der Arbeit direkt erwähnt oder dienen wie z.B. AMV 8.1 und AMV 9.1 zum weiteren Verständnis.

Schlussendlich gibt der Ordner **Tabellen** und **Abbildungen** im Anhang, das EXCEL-Format zu den Tabellen und Abbildungen im Text an, sofern sie in EXCEL erstellt wurden.

Unter Abbildungen sind Excel-Dateien aufgelistet die explizit in dieser Arbeit erwähnt werden, darunter:

- Abbildung 1: Daten der IIASA GAINS Studie
- Abbildung 2: Angaben zum QUANTIFY-Kapitel
- Abbildung 3: Die Entwicklung des PKW Bestandes wird dargestellt
- Abbildung 4: Grundlagen zur Mauna-Loa Modellierung

Alle im CD-Anhang aufgeführten Dateien wurden vom Betreuer G. Kohlmaier in der Zeit zwischen der Abgabe und der Verteidigung im Kolloquium redigiert und tragen das Kürzel **KB** (Kohlmaier an Bremicker). In den Anhang wurden auch die Rohdaten mit

aufgenommen. Eine nachträglich fertiggestellte Zusammenfassung in englischer Sprache ist ebenfalls beigefügt.

Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Gundolf Kohlmaier bedanken für wertvolle inhaltliche und persönliche Unterstützung.

Ferner ist Herr Prof. Püttmann zu nennen, dass er den Masterstudiengang Umweltwissenschaften ins Leben gerufen hat.

Bei Frau Anja Jungbauer möchte ich mich bedanken, dass sie mir bei der Arbeit und Korrektur zur Seite stand.

Folgende Personen und Institute sind für andauerndes Interesse und kooperative Zusammenarbeit zu nennen:

- Jens Borken vom IIASA Institut
- T. Siddiqi vom GEE 2100
- P. Olejarnik vom IEA
- K. Gierens vom DLR

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die Master-These selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet habe. Diese Arbeit wurde noch keiner Kommission zur Prüfung vorgelegt und verletzt in keiner Weise Rechte Dritter.

Frankfurt, den 06.12.2010

Felix Bremicker

Masterstudent

Prof. Dr. Gundolf Kohlmaier

Betreuer