

Mai 2008

# WISO

# Diskurs

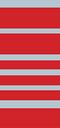
Experten und Dokumentationen  
zur Wirtschafts- und Sozialpolitik

## Klimaschutz und Straßenverkehr

Effizienzsteigerung und Biokraftstoffe  
und deren Beitrag zur Minderung der  
Treibhausgasemissionen

Arbeitskreis  
Innovative Verkehrspolitik





Kurzstudie für die Friedrich-Ebert-Stiftung, Bonn

---

## **Klimaschutz und Straßenverkehr**

Effizienzsteigerung und Biokraftstoffe  
und deren Beitrag zur Minderung der  
Treibhausgasemissionen

Wiebke Zimmer / Uwe Fritsche

# Inhalt

---

Vorbemerkung	3
1. Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor	4
2. Steigerung der Fahrzeugeffizienz	8
2.1 Technologien zur Effizienzsteigerung von Pkw	8
2.1.1 Maßnahmen am Antriebssystem	8
2.1.2 Maßnahmen zur Optimierung von Getriebe und Fahrwiderständen	11
2.1.3 Beispiele für aktuelle, effiziente Pkw-Modelle	13
2.2 Treibhausgasminderungspotenziale eines CO <sub>2</sub> -Grenzwerts für Pkw	14
2.3 Exkurs: Alternative Antriebskonzepte	18
2.4 Technologien zur Effizienzsteigerung von schweren Nutzfahrzeugen	20
3. Einsatz von Biokraftstoffen	23
3.1 Biokraftstoffoptionen	23
3.2 Minderungspotenziale durch den Einsatz von Biokraftstoffen	24
3.2.1 Lebenswegbilanzen für Treibhausgasemissionen von Biokraftstoffen	24
3.2.2 Treibhausgasminderungspotenzial für den Straßenverkehr	26
4. Zusammenfassende Betrachtung	27
5. Literatur	30
Informationen zu den Autoren	34

Die Kurzstudie wird von der Abteilung Wirtschafts- und Sozialpolitik der Friedrich-Ebert-Stiftung veröffentlicht. Die Ausführungen und Schlussfolgerungen sind von den AutorInnen in eigener Verantwortung vorgenommen worden.

## Vorbemerkung

---

In welcher Welt wollen wir morgen leben? Die Globalisierung habe in eine Welt geführt, in der Probleme nur noch gemeinsam zu lösen seien, lautet das gängige Motto. Wie schwierig es fällt, dem Motto „global denken – lokal handeln“ mit konkreten Maßnahmen zu folgen, zeigt sich bei der Bekämpfung des Klimawandels. Die Lebensqualität im globalen Maßstab zu sichern, heißt wirtschaftlichen Fortschritt und soziale Kohäsion zu ermöglichen, ohne die ökologische Belastbarkeit zu verletzen. Das Problem ist erkannt, aber keineswegs gebannt: Zwar hat sich die Staatengemeinschaft mit dem Kyoto-Protokoll auf die Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen geeinigt. In den ersten sechs Jahren dieses Jahrhunderts sind sie jedoch noch stärker gestiegen als in den Klimamodellen errechnet. Eine mögliche Minderung von Emissionen ist bisher nur in Ansätzen erkennbar.

Der Verkehrssektor gehört mit ca. 20 Prozent aller energiebedingten Treibhausgasemissionen neben der Industrie und der Energiewirtschaft in Deutschland zu dem Bereich mit den höchsten Treibhausgasemissionen. Auch wenn gegenwärtig davon ausgegangen wird, dass die mit dem PKW zurückgelegten Kilometer rückläufig sind, werden immer mehr Güter immer weiter mit dem LKW transportiert – von einer signifikanten Absenkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes ist der Verkehrssektor somit weit entfernt.

Vor diesem Hintergrund hat die Europäische Kommission die Einführung eines CO<sub>2</sub>-Grenzwertes für Neufahrzeuge und die stärkere Nutzung von Biokraftstoffen vorgeschlagen. Die Höhe und die Folgen des Grenzwertes werden sowohl von Umweltschützern als auch von Automobilbauern kritisiert. Verdienen diese Höchstgrenzen das Prädikat ambitioniert? Um wie viel Prozent lassen sich die Treibhausgasemissionen damit verringern? Und welchen Effekt haben Biokraftstoffe?

Die vorliegende Studie zeigt, dass der von der Kommission geforderte Grenzwert eine Herausforderung ist – aber nicht unrealistisch. Sie zeigt aber auch, dass der Beitrag für den Klimaschutz nur nennenswert ist (Minderungspotenzial 10,2 Prozent in 2020), wenn der Grenzwert zügig umgesetzt und für 2020 fortgeschrieben wird. Gleiches gilt für die Beimischung von Biokraftstoff (Minderungspotenzial 5 Prozent in 2020). Es wird aber auch deutlich, dass die Biokraftstoffe nur einen Beitrag leisten können, wenn sie eine erheblich bessere Klimabilanz aufweisen können.

Der Beitrag, den Grenzwerte bei PKWs und Biokraftstoffquoten zum Klimaschutz insgesamt leisten können, ist, wie die Studie aufzeigt, nicht unerheblich, aber er ist begrenzt. Mit Hilfe dieser Maßnahmen lassen sich die Treibhausgasemissionen bis zum Jahre 2020 um ca. 14,6 Prozent (ca. 20 Prozent bei Vernachlässigung der Kraftstoffvorketten) vermindern. Andere Wirtschaftssektoren sollen 40 Prozent reduzieren. Reicht der Anteil des Verkehrssektors, oder geben wir uns mit seinem Beitrag zum Klimaschutz nicht zufrieden?

Wie können höhere Einsparpotenziale erschlossen werden und gleichzeitig die Lasten volkswirtschaftlich sinnvoll und sozial gerecht verteilt werden? Welcher Anreiz kann und sollte von einer Umgestaltung der Kraftfahrzeugsteuer, der Pendlerpauschale, der Raumordnungspolitik, einem Tempolimit etc. ausgehen? Die Studie zeigt, dass wir – anstatt auf Biokraftstoffe und Grenzwerte zu hoffen – Antworten auf die Frage finden sollten, wie wir unsere Transportmittel und die Wahl des Verkehrsträgers so gestalten, dass wir weiterhin mobil bleiben und der Klimawandel trotzdem begrenzt werden kann.

*René Bormann*

Arbeitskreis Innovative Verkehrspolitik

## 1. Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor

Angesichts der Herausforderungen der globalen Erwärmung hat die Bundesregierung in ihrem Klimaprogramm das Ziel formuliert, die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2020 gegenüber dem Basisjahr 1990 um 40 Prozent zu senken. Der Verkehrsbereich trug im Jahr 2005 mit etwa 20 Prozent zu den energiebedingten Treibhausgas (THG)-Emissionen in Deutschland bei, wobei knapp 93 Prozent auf den Straßenverkehr zurückzuführen sind (UNFCCC 2007). Und entgegen dem Trend in anderen Sektoren sind die vom Verkehr ausgehenden Emissionen zwischen 1990 und 2004 mit rund 3 Prozent sogar angestiegen (TREMODO 2006). Die Ursache dafür lag in erster Linie in der gestiegenen Verkehrsleistung, die zwischen 1990 und 2000 allein im Güterverkehr um 41 Prozent anstieg (UBA 2003). Auch wenn nach 1999 kein signifikanter Anstieg der Fahrleistungen im Personenverkehr und eine leichte Abnahme der verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verzeichnen waren, wird in aktuellen Studien bis 2030 in einem Business-as-Usual-Szenario mit deutlichen Zuwächsen des Verkehrsaufwandes und somit nicht mit signifikanten CO<sub>2</sub>-Minderungen im Transportsektor gerechnet.

Prognosen und Szenarien der mittel- bis langfristigen Verkehrsentwicklung dienen der Infrastrukturplanung, oft werden sie aber auch zur Analyse verkehrspolitischer, technologischer oder betrieblicher Entwicklungen und Strategien eingesetzt. Aus diesem Grund existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Herangehensweisen und Instrumente zur Prognose der künftigen Verkehrsentwicklung und das methodische Vorgehen der veröffentlichten Verkehrsprognosen bzw. -szenarien ist sehr unterschiedlich. Die aktuell meist zitierten Studien bzw. Prognosen sind:

- Die Studie „Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030 – Energiewirtschaftliche Referenzprognose“ (Energieraport IV) wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie in Auftrag gegeben, um einen analytischen Blick auf die energiewirtschaftliche Entwicklung in Deutschland bis 2030 zu ermöglichen (EWI/Prognos 2005). Ergebnis ist, dass der Endenergieverbrauch des Verkehrs 2030 um 3,7 Prozent unter dem Referenzjahr 2002 liegen wird. Grund hierfür ist eine Abnahme des Energieverbrauchs im Straßenverkehr von 2 301 Petajoule (PJ) auf 2 004 PJ. Der Energieverbrauch des Flugverkehrs steigt dagegen von 287 PJ auf 455 PJ im Jahr 2030. Die Personenverkehrsleistungen ändern sich nur wenig, die des Güterverkehrs steigen bis 2030 um 58 Prozent an. Auf Basis dieses Energieberichts wurde zusätzlich ein Hochpreisszenario mit Rohölpreisen, die im Jahr 2030 um 60 Prozent über den Preisen der Referenzprognose liegen, berechnet (EWI/Prognos 2006). Die Personenverkehrsleistung liegt in diesem Szenario im Jahr 2030 um etwa 4 Prozent unter dem Ausgangsniveau, wobei Schiene und ÖPNV deutlichere Zuwächse als im Referenzszenario zu verzeichnen haben. Im Güterverkehr werden – statt wie im Referenzszenario 58 Prozent – Zuwächse von 56 Prozent errechnet.

• Eine weitere wesentliche Studie zur Entwicklung der Indikatoren im Verkehrssektor ist die „Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025“ im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (ITP/BVU 2007). Sie geht von einem Wachstum der Verkehrsleistung im Personenverkehr zwischen 2004 und 2025 um 17,9 Prozent aus, wobei der motorisierte Individualverkehr um 19,4 Prozent steigen wird. Als Gründe werden das Wirtschaftswachstum

1 Business-as-Usual-Szenario: Szenario ohne zusätzliche Maßnahmen

und die starke Präferenz für die Individualmotorisierung genannt. Das Wachstum des Pkw-Bestands wird bis 2025 – bezogen auf das Basisjahr 2002 – auf 12,5 Prozent prognostiziert. Im gesamten Güterfernverkehr steigt die Transportleistung auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland um 74 Prozent. Der Straßengüternahverkehr wächst mit 11 Prozent erheblich langsamer.

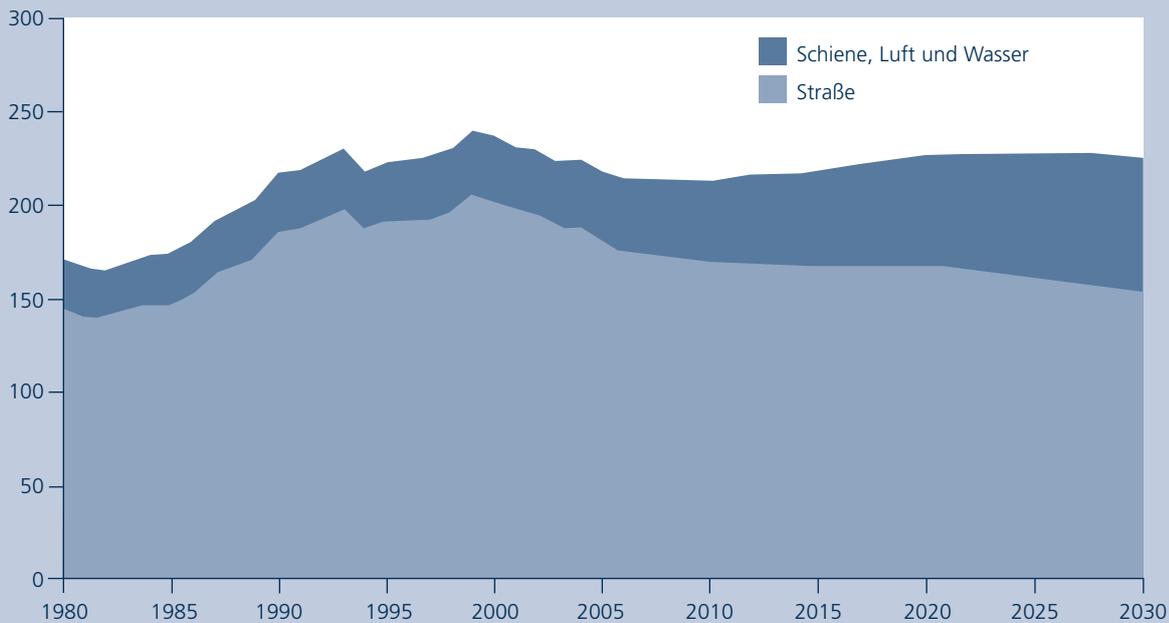
- Das Forschungsvorhaben „Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960–2030“ (TREMOD 4) ist vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes im November 2005 fertig gestellt und im Anschluss bezüglich der Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der neu zugelassenen Pkw und der Biokraftstoffe überarbeitet worden (TREMOD 2006/IFEU 2007). Die Studie TREMOD 4 enthält in dieser aktuellen Version die Realdaten von 1960 bis 2003 sowie Prognosedaten bis 2030. Bis zum Jahr 2030 wird im TREMOD-Szenario bezogen auf den

Straßenverkehr von einer weiteren Zunahme der Personenverkehrsleistung von rund 8 Prozent und der Güterverkehrsleistung von etwa 54 Prozent gegenüber 2005 ausgegangen. Zusätzlich werden starke Zuwächse im Flugverkehr prognostiziert.

Alle Studien gehen von einem weiteren Anstieg der Verkehrsleistungen vor allem im Güterverkehr, steigenden Pkw-Zahlen und nur geringen Verlagerungen unter den einzelnen Verkehrsträgern aus. Die Abbildung 1 zeigt die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrssektors in der Vergangenheit und eine Prognose auf der Basis der TREMOD-Studie. Relativ am stärksten wächst der Luftverkehr, so dass sich bis 2030 insgesamt ein Anstieg der verkehrsbedingten Emissionen ergibt. Deutlich wird, dass der Straßenverkehr mit Abstand den höchsten Anteil an den verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweist. Es wird davon ausgegangen, dass die Emissionen des Straßenverkehrs trotz steigender Fahrleistungen leicht abnehmen werden. Dies ist auf eine dem TREMOD-Szenario hinterlegte Effizienzsteigerung der Fahrzeuge zu-

Abbildung 1:

**CO<sub>2</sub>-Emissionen des Transportsektors in Deutschland nach Verkehrsträgern in Mt, ab 2005 Prognose**



Quelle: TREMOD 2006

rückzuführen, die die wachsende Fahrleistung wieder ausgleicht. Die TREMOD-Szenarien werden im Folgenden für die Berechnungen möglicher Minderungspotenziale verschiedener technologischer Optionen verwendet, da die zu Grunde liegenden Daten vom Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt werden und TREMOD auch zur offiziellen Berichterstattung der Bundesregierung bezüglich der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors herangezogen wird.

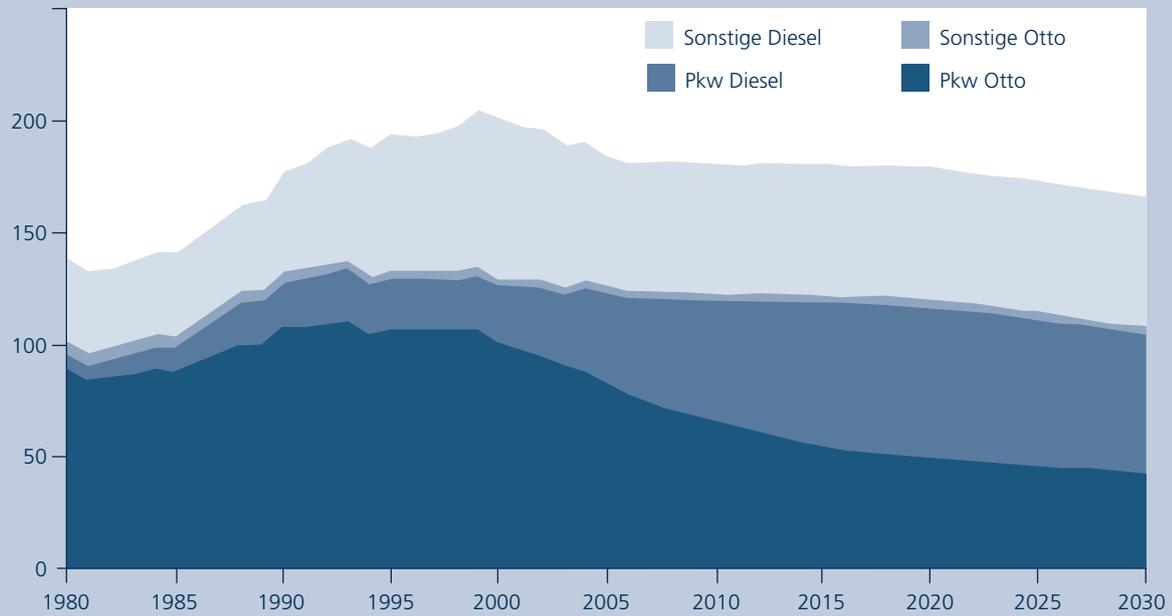
Um eine umfassende Bewertung des Straßenverkehrs bezüglich seiner Klimarelevanz durchführen zu können, müssen alle klimawirksamen Emissionen inklusive der Kraftstoffvorketten, die vor allem bei den Biokraftstoffen ausschlaggebend sind, mit in die Betrachtung einbezogen werden. Um diese abzubilden, wird vom Energiebedarf des Straßenverkehrs entsprechend TREMOD ausgegangen. Über die Entwicklung des Energieverbrauchs werden mit Hilfe der im Entwurf der Biomassenachhaltigkeitsverordnung definierten Treibhausgasemissionen für Otto- und Dieselmotoren (85 und 86,2 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent/GJ) (BioNV 2007) die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs inklusive der Kraftstoffvorkette als Referenz ermittelt. Es ist davon auszugehen, dass es sich bei der so prognostizierten Entwicklung (siehe Abbildung 2) um eine verhältnismäßig optimistische Prognose handelt, da erwartet wird, dass ab 2010/2020 die Treibhausgasemissionen der fossilen Kraftstoffe in der Vorkette ansteigen werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zusätzliche Quellen erschlossen werden müssen, die weniger energieeffizient sein werden. Die Nutzung von Biokraftstoffen ist bei dieser Prognose nicht berücksichtigt.

Abbildung 2 zeigt sehr deutlich, dass die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs nicht unter das Referenzjahr 1990 zurückgehen. Weder im Rahmen des Kyoto-Protokolls – in dessen Kontext sich Deutschland zu einer Minderung der Treibhausgasemissionen von 21 Prozent in der Berichtsperiode 2008 bis 2012 verpflichtet hat – noch bei der Festlegung der Klimaschutzziele der Bundesregierung von 40 Prozent Reduzierung der Emissionen bis 2020 sind konkrete Minderungsbeiträge für den Verkehrssektor expli-

zit definiert. Es stellt sich aber die grundsätzliche Frage, welche Maßnahmen notwendig sind, damit auch der Verkehrssektor seinen Beitrag zu den mittel- und langfristigeren Erfordernissen des globalen Klimaschutzes leisten kann, denn bei ausbleibender Minderung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor muss dies von anderen Sektoren kompensiert werden. Von der Politik werden gegenwärtig hauptsächlich sogenannte technische Maßnahmen, also Maßnahmen zur Effizienzsteigerung von Pkw und eine Erhöhung des Anteils an Biokraftstoffen, diskutiert. Maßnahmen zur Verkehrsverlagerung und Vermeidung werden in diesem Zusammenhang nur vage angesprochen. Vor diesem Hintergrund soll im Folgenden aufgezeigt werden, welche Treibhausgaseminderungspotenziale durch technische Maßnahmen im Verkehrssektor tatsächlich erreicht werden können. Das Arbeitspapier soll als Diskussionsgrundlage dienen, um darauf aufbauend weiteren Handlungsbedarf zu identifizieren und mögliche Maßnahmen zu diskutieren. Es werden zunächst auf der Basis von Literaturlauswertungen Technologieoptionen zur Steigerung der Effizienz von Pkw vorgestellt. Anschließend wird ein kurzer Ausblick auf die aktuelle Diskussion um Grenzwerte für die CO<sub>2</sub>-Emissionen neu zugelassener Pkw gegeben und darauf basierend in drei Grenzwertszenarien Minderungspotenziale durch die Einführung entsprechender Grenzwerte berechnet. Das Kapitel zu den Fahrzeugtechnologien wird abgeschlossen mit einem Exkurs über alternative Antriebssysteme für Pkw und einem Ausblick bezüglich der Effizienzsteigerungsoptionen bei Lkw. Das zweite Kapitel befasst sich entsprechend zunächst überblicksartig mit den Biokraftstoffoptionen, geht dann über zu den methodischen Fragen der Bilanzierung der Treibhausgasemissionen von Biokraftstoffen, um dann auch für deren Einsatz die Minderungspotenziale aufzuzeigen. Abschließend werden die technologischen Optionen – Effizienzsteigerung von Pkw und Biokraftstoffe – gemeinsam betrachtet und in den Kontext zu weiteren Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor gestellt.

Abbildung 2:

**Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland inklusive Kraftstoffvorketten nach Motortyp<sup>2</sup> in Mt, ab 2005 Prognose**



Quelle: TREMOD 2006, BioVO 2007, eigene Berechnungen

<sup>2</sup> Sonstige Otto: Motorisierte Zweiräder; Sonstige Diesel: Lkw, Busse

## 2. Steigerung der Fahrzeugeffizienz

### 2.1 Technologien zur Effizienzsteigerung von Pkw

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines konventionell betriebenen Pkw sind direkt mit dem Kraftstoffverbrauch gekoppelt. Das heißt, je weniger fossilen Kraftstoff ein Pkw verbraucht, desto geringer sind auch dessen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Maßgebliches Augenmerk erhalten deshalb technische Effizienzsteigerungsmaßnahmen bei Pkw. Grundsätzlich kann die Effizienz von Fahrzeugen direkt an Energiewandler und Antriebsstrang verbessert werden oder aber über eine Verringerung der Fahrwiderstände, die über Gewicht, Aerodynamik und Rollwiderstände beeinflussbar sind.

Vor dem Hintergrund der aktuellen politischen Diskussion sind eine Vielzahl von Studien zu den Potenzialen verschiedener Technologieoptionen veröffentlicht worden. Auf europäischer Ebene prominenteste Studie ist derzeit die „Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO<sub>2</sub>-emissions from passenger cars“ (TNO 2006), die im Auftrag der Europäischen Kommission im Oktober 2006 veröffentlicht worden ist und deren Ergebnisse maßgeblicher wissenschaftlicher Input zur Erarbeitung des Kommissionsvorschlags für CO<sub>2</sub>-Grenzwerte neu zugelassener Pkw war. Die Inputdaten stammen aus Literaturrecherchen und sind von den Interessenvertretungen der Automobilhersteller (ACEA, JAMA, KAMA und CLEPA) bereitgestellt bzw. mit diesen abgestimmt worden<sup>3</sup>.

Wichtig ist es bei einem Vergleich der Minderungspotenziale im Blick zu behalten, dass diese sehr stark von der Fahrsituation und damit dem Fahrzyklus abhängen, in dem der Kraftstoffverbrauch gemessen wurde. Die Größenordnung der Reduktionspotenziale ist, auch wenn es sich um verschiedene Zyklen handelt, vergleichbar – solange diese nicht extreme Fahrsituationen wie beispielsweise reinen Innerortsverkehr mit hohen Start-Stopp-Anteilen widerspiegeln. Ein weiterer relevanter Aspekt ist der Zeitpunkt der Einführung der verschiedenen Technologien, da die Minderungspotenziale aufgrund weiterer technischer Optimierungen längerfristig in der Regel höher anzusetzen sind als kurzfristig.

#### 2.1.1 Maßnahmen am Antriebssystem

Nahezu alle Pkw-Antriebssysteme, die derzeit angeboten werden, basieren auf den klassischen Verbrennungsmotoren, dem Otto- beziehungsweise Dieselpinzip. Trotz deren steter Weiterentwicklung in den letzten Jahrzehnten bieten auch diese Motoren noch Potenzial, um den Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge zu reduzieren. Hierbei handelt es sich vor allem um die Reduzierung von Reibungsverlusten im Motor, Gewichtsoptimierungen der Motorkonstruktion, Optimierungen im Kühlkreislauf und die Einführung innovativer Einspritz- und Zündtechniken. Weitere diskutierte Optimierungsmöglichkeiten bieten die variable Ventilsteuerung bzw. die variable Zylinderabschaltung. Hinzu kommt der Umstand,

3 Weitere Auswertungen und Zusammenstellungen von Technologien zur Effizienzsteigerung von Pkw sind zu finden in „Staff proposal regarding the maximum feasible and cost-effective reduction of greenhouse gas emissions from passenger cars“ der California Environmental Protection Agency and Air Resources Board (CARB 2004), in der Studie „Reducing Greenhouse Gas Emissions from Light-Duty Motor Vehicles“ des Northeast States Center for a Clean Air Future (NESCCAF 2004), in „Carbon to Hydrogen Roadmap for Passenger Cars: update of the study“, finanziert von dem britischen Department for Transport und dem Department of Trade and Industry (Ricardo 2003), in der Aktualisierung 2006/2007 der europäischen WTW-Studie von Concawe/Eucar/JRC (Concawe 2007), in der „IEA study: Making cars more fuel efficient: Technology for Real Improvements on the Road“ (IEA 2005), einer Studie des britischen Finanzministeriums (HM Treasury) „The King Review of low-carbon cars“, Part I (King 2007) und der Studie „Klimawirksame Emissionen des PKW-Verkehrs und Bewertung von Minderungsstrategien“ des Wuppertal Instituts (WI 2006).

dass Otto-Motoren unter Teillast einen vergleichsweise schlechten Wirkungsgrad aufweisen, der – wenn der Motor kleiner ausgelegt wird – verbessert werden kann, da er dann häufiger im effizienten Bereich arbeitet. Dies ist zusätzlich mit Verbrauchsvorteilen, unter anderem durch den leichteren Motor, verbunden. Über Aufladungskonzepte, das heißt über eine höhere Verdichtung des Luft-Kraftstoffgemisches mit Hilfe von Abgasturboladern, können begleitend die Bereiche höherer Leistungsanforderung bedient werden. Je nach dem Maß des so genannten Motor-Downsizing mit Aufladung kann der Kraftstoffverbrauch von Otto-Motoren um bis zu 30 Prozent reduziert werden. Weitere Potenziale können durch Direkteinspritzung (DI) erschlossen werden. Diese Technik ist beim Diesel heute Stand der Technik und wird von verschiedenen Herstellern auch beim Otto-Motor mit unterschiedlichen Konzepten bezüglich Betriebsart (Schicht- oder Homogenbetrieb) und Einspritzstrategie (wand- oder strahlgeführt) entwickelt. So können Drosselverluste umgangen und das Verdichtungsverhältnis erhöht werden. Zu beachten ist, dass bei Otto-Motoren mit Direkteinspritzung eine Abgasnachbehandlung für die NO<sub>x</sub>-Emissionen eingeführt werden muss. Mittelfristig kann davon ausgegangen werden, dass Benzin-Direkteinspritzung Kraftstoffverbrauchsreduktion von

10 bis 16 Prozent ermöglicht. Insgesamt weisen Optimierungen am Otto-Motor noch große Potenziale zur Effizienzsteigerung auf, die kombiniert durchaus mehr als 25 Prozent (siehe Aufstellung Tabelle 1) erreichen können.

Generell haben Diesel- gegenüber Otto-Motoren einen prozessbedingten Verbrauchsvorteil, der zwischen 20 und 30 Prozent liegt. Die Möglichkeiten zur weiteren Kraftstoffeinsparung sind beim Diesel-Motor deutlich geringer als beim Otto-Motor, da dieser beispielsweise durch die elektronische Direkteinspritzung und Aufladung in der Vergangenheit bereits stärker auf den Verbrauch optimiert wurde. Weitere Verbesserungen sind vor allem durch eine Reduzierung der Motorenreibung und – entsprechend dem Otto-Motor – ein weiteres Motor-Downsizing mit verbesserter Abgasrückführung möglich. Auch die Zylinderdeaktivierung und Optimierungen im Kühlkreislauf weisen weitere Kraftstoffeinsparpotenziale bei Diesel-Pkw auf, was zeigt, dass auch für den Dieselmotor bezüglich seiner Effizienz noch Optimierungspotenzial von etwa 15 Prozent erschlossen werden kann (siehe Aufstellung Tabelle 2).

Eine weitere grundsätzliche Möglichkeit, den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren, ist es, die Leistung eines Fahrzeuges herabzusetzen. So variieren die Kraftstoffverbräuche innerhalb eines Pkw-

Tabelle 1:

### CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale von Otto-Motoren durch ausgewählte Maßnahmen, Angaben in Prozent

Reduzierte Motorenreibung	<5 %
DI / homogen	3 %
DI / schichtgeladen (magere Verbrennung)	10–16 %
Downsizing mit Aufladung	8,5–30 %
Optimierung Kühlkreislauf	3–6 %
Variable Ventilsteuerung	2–11 %
Zylinderdeaktivierung	2–8 %

Quellen: TNO 2006, CARB 2004, IEA 2005, WI 2006

Tabelle 2:

**CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale von Diesel-Motoren durch ausgewählte Maßnahmen, Angaben in Prozent**

Reduzierte Motorenreibung	<5 %
Downsizing	10 %
Optimierung Kühlkreislauf	3–6 %
Zylinderdeaktivierung	2–8 %

Quelle: TNO 2006

Modells je nach Leistung erheblich. Die Differenz der Leistung und auch der Kraftstoffverbräuche innerhalb eines Pkw-Modells kann bis zu 50 Prozent betragen. Wie die letzten Jahre deutlich gemacht haben, geht der Trend im Fahrzeugangebot und auch im Käuferverhalten jedoch tendenziell in Richtung höherer Leistung. Die Leistung der in Deutschland neu zugelassenen Pkw hat zwischen 1995 und 2006 um 33 Prozent zugenommen. In Simulationsstudien im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) wurde das Verbrauchsminderungspotenzial eines Golf V ermittelt (UBA 2007). Der Basismotor (1,4l TSI, 125 kW) wurde entsprechend auf 50 kW skaliert. Im neuen Europäischen Fahrzyklus konnten alleine durch das Motor-Downsizing Verbrauchseinsparungen von rund 28 Prozent ermittelt werden. Durch Folgeeffekte wie Gewichtseinsparungen beim Motor und Reduktion des Roll- und Luftwiderstandes durch schmalere Reifen zeigte die Simulation insgesamt ein Potenzial von etwa 33 Prozent. Vor allem bei geringen Antriebsleistungen – also innerorts – können durch eine Hubraumverkleinerung deutliche Einspareffekte erzielt werden. Einschränkungen ergeben sich durch die Leistungsminderung vor allem bei den Beschleunigungswerten und der Maximalgeschwindigkeit des Pkw, die jedoch bei gemäßigter Leistungsreduzierung – wie in der Studie des Umweltbundesamtes modelliert – nicht die Fahrsicherheit beeinflus-

sen. Diese Möglichkeit der Kraftstoffeinsparung zeichnet sich besonders dadurch aus, dass sie keine zusätzlichen Kosten verursacht, im Gegenteil das Fahrzeug durch die eingesparten Materialien sogar günstiger hergestellt werden kann. Wie die Simulation im Auftrag des UBA gezeigt hat, sind also durch Motor-Downsizing erhebliche zusätzliche Einsparpotenziale zu realisieren, die entsprechend von der Ausgangsleistung abhängig sind. Im oben genannten Beispiel ermöglicht das Downsizing inklusive der Folgeeffekte eine Einsparung von 33 Prozent.

Die konventionellen Verbrennungsmotoren können in einem weiteren Schritt mit einem Elektromotor kombiniert werden. Solche Fahrzeuge, die auf zwei verschiedenen Antriebssystemen beruhen, werden als Hybridfahrzeuge bezeichnet.<sup>4</sup> Unterschieden wird grundsätzlich zwischen Parallelhybriden, bei denen beide Antriebssysteme das Fahrzeug antreiben können, und den seriellen Hybriden, bei denen der Verbrennungsmotor nur noch als Generator eingesetzt wird und der Antrieb rein elektromotorisch ausgelegt ist. Zusätzlich sind Mischformen umsetzbar, wie sie beim Toyota Prius verwirklicht wurden. Neben der Unterscheidung zwischen parallelen, seriellen und Mischhybriden werden die Fahrzeuge entsprechend dem Grad ihrer Hybridisierung als Mikro-, Mild- oder Vollhybrid bezeichnet und weisen jeweils unterschiedliche Kraftstoffminde-

<sup>4</sup> Die aktuell in Europa angebotenen Hybrid-Fahrzeuge kombinieren ausschließlich Ottomotoren mit Elektromotoren. Aber die Kombination mit einem Dieselmotor ist bereits von verschiedenen Herstellern angekündigt und weitere Kombinationen beispielsweise mit Erdgasmotoren sind denkbar.

rungspotenziale auf. Die Verbrauchsvorteile von Hybridfahrzeugen resultieren vor allem aus der Vermeidung der Leerlaufphasen und der Rekuperation, bei der teilweise die Bremsenergie rückgewonnen und als Strom in der mitgeführten Batterie gespeichert wird. Hinzu kommen beim Mild- und Vollhybriden die verbesserte Ausnutzung des unteren Teillastbereichs durch den Elektromotor und die Möglichkeit zur kleineren Auslegung des Verbrennungsmotors, da der Elektromotor den Verbrennungsmotor im Volllastbereich unterstützen kann. Grundsätzlich können die höchsten Verbrauchsminderungspotenziale im innerstädtischen Bereich erzielt werden, da hier die Rekuperation durch die Bremsvorgänge und der Vorteil im Teillastbereich am höchsten sind. Berücksichtigt werden muss jedoch, dass durch den zusätzlichen Motor und vor allem die Batterie das Gewicht des Fahrzeuges ansteigt und damit ein Mehrverbrauch zu verzeichnen ist, der in der Regel zwar durch die Vorteile des Hybrids mehr als kompensiert wird, im Volllastbereich auf der Autobahn aber durchaus zu leichtem Mehrverbrauch führen kann.

Die Mikrohybridisierung findet derzeit mit der Start-Stopp-Automatik und Rückgewinnung von Bremsenergie verstärkt Einzug in den Neuwagenmarkt. Sie ist beispielsweise Gegenstand der „Efficient Dynamics“-Serie von BMW und wird beim Mercedes Sprinter als Sonderausstattung angeboten. Milde Hybride nutzen den Elektromotor zur Unterstützung des Verbrennungsmotors, wie es zum Beispiel in einer Version des Honda Civic realisiert ist. Vollhybride – wie z.B. der Toyota Prius – sind Fahrzeuge, die auch mit reinem Elektroantrieb gefahren werden können.

Die Angaben zu Verbrauchsreduktionen variieren erheblich. TNO (2006) gibt für den milden Hybrid Einsparpotenziale von rund 10% und für den Vollhybrid von rund 22% an. In CARB (2004) wird davon ausgegangen, dass ein fortgeschrittener Vollhybrid fast bis zu 40% Kraftstoff einsparen kann (siehe Tabelle 3).

### 2.1.2 Maßnahmen zur Optimierung von Getriebe und Fahrwiderständen

Nicht nur am Antrieb selbst können Effizienzsteigerungen erschlossen werden, auch das Getriebe-system kann den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeuges deutlich beeinflussen. Getriebe können bezüglich der Übertragungsverluste und der Wahl der Übersetzungen für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten zu einer Effizienzsteigerung des Fahrzeuges beitragen. Durch eine höhere Anzahl von Übersetzungen kann der Betriebspunkt des Motors häufiger in Bereiche mit besseren Wirkungsgraden verschoben werden. Zukünftig werden daher die Systeme überwiegend über 6 bis 7 Gänge verfügen. Verbrauchsvorteile von 5 bis 8 Prozent bieten automatische Schaltgetriebe, bei denen der manuelle Schaltvorgang technisch unterstützt wird und so die Gangübersetzung besser an den aktuellen Motorenbetrieb angepasst und die Schaltzeit verkürzt werden kann. Des Weiteren sind Doppelkupplungsgetriebe, die die Effizienz eines Pkw um rund 5 Prozent verbessern können, in der Entwicklung oder bereits wie bei Volkswagen unter dem Kürzel DSG in der Serie erhältlich. Ebenfalls hohe Einsparpotenziale von bis zu 8 Prozent versprechen stufenlose Automatikgetriebe (sogenannte CVT-Getriebe), die dafür

Tabelle 3:

#### CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale ausgewählter Arten von Hybridantrieben, Angaben in Prozent

Mikrohybrid (Start-Stopp-Automatik)	5–7 %
Milder Hybrid	10–35 %
Vollhybrid	18–40 %

Quellen: TNO 2006, CARB 2004, IEA 2005

Tabelle 4:

**CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale ausgewählter Maßnahmen an Getrieben, Angaben in Prozent**

Automatisiertes Schaltgetriebe	4–8 %
Doppelkupplung	5 %
Stufenlose Automatikgetriebe	3–8 %

Quellen: TNO 2006, CARB 2004, IEA 2005, WI 2007

sorgen, dass sich die Motordrehzahl stets im optimalen Bereich befindet. Das Minderungspotenzial durch Maßnahmen am Getriebesystem ist auf 3 bis 8 Prozent zu beziffern (siehe Tabelle 4).

Zusätzlich zu den Effizienzsteigerungspotenzialen am Antriebsstrang stehen Verbesserungsmöglichkeiten am Fahrzeugbody zur Verfügung, die die Fahrwiderstände reduzieren können. Bis auf den Luftwiderstand hängen alle Fahrwiderstände – Roll-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstände – maßgeblich vom Gewicht des Fahrzeuges ab. Durch Leichtbaumaßnahmen kann der Kraftstoffverbrauch reduziert werden. Vor allem diskutiert und umgesetzt wird die Substitution von schweren durch leichtere Materialien, also der Einsatz von Aluminium, Magnesium, höherfesten Stählen oder Kunst- bzw. Faserverbundwerkstoffen. Hier muss jedoch beachtet werden, dass deren Herstellung zum Teil deutlich energieintensiver ist als die der konventionellen Baumaterialien. Eine weitere Möglichkeit, Fahrzeuge leichter zu gestalten, ist die Reduzierung des Materialeinsatzes. Durch konzeptionelle Veränderungen können Bauteile eingespart oder minimiert und so das Gewicht reduziert werden, ohne dass zusätzliche energieintensive Materialien benötigt werden. Unter anderem aufgrund steigender Anforderung bezüglich Komfort und Sicherheit hat das Gewicht der neu zugelassenen Pkw in den letzten Jahren stetig zugenommen, so dass hier dringend eine Trendumkehr notwendig wird. Das größte Potenzial zur Gewichtsreduzierung besteht bei der Karosserie. Wenn der Motor kompakter – was auch ein Downsizing impliziert – gebaut wer-

den würde, sind zusätzlich im Antriebsstrang deutliche Minderungen zu realisieren. Die durch eine Gewichtsreduzierung zu erwartende Kraftstoffeinsparung hängt stark von der Fahrsituation ab, da sie bei Beschleunigungsvorgängen am höchsten ist. Bei Pkw ist davon auszugehen, dass sich mit einer Gewichtsreduktion von 100 kg zwischen 0,1 und 0,5 l Kraftstoff auf 100 km einsparen lassen (IFEU 2003).

Neben dem Gewicht wird der Rollwiderstand maßgeblich durch die elastische Verformung der Reifen beeinflusst. Durch eine Optimierung der Rollwiderstände von Reifen kann der Kraftstoffverbrauch um 2 bis 5 Prozent reduziert werden. Es gibt bereits ein Angebot an sogenannten Leichtlaufreifen, die jedoch nicht unter einheitlichen und damit eindeutigen Begrifflichkeiten angeboten werden. Das Umweltzeichen „Blauer Engel“ bietet theoretisch verlässliche Kriterien u. a. bezüglich des Rollwiderstandes, wird von den Herstellern jedoch nicht genutzt. Grundsätzliches Problem ist damit auf der einen Seite die mangelnde Kennzeichnung; auf der anderen Seite gibt es bei der Reifenherstellung Zielkonflikte zwischen Bremsverhalten (vor allem Nassbremsverhalten) und optimiertem Rollwiderstand, so dass einige Hersteller dem letzteren eine geringere Priorität bei der Entwicklung zukommen lassen. Derzeit wird auf EU-Ebene ein Vorschlag für Rollwiderstandswerte und ein Labelling von Reifen im Sinne der „Weißen Ware“ nach Energieeffizienzklassen diskutiert. Eine solche Richtlinie wird voraussichtlich das Angebot an rollwiderstandsoptimierten Reifen erweitern.

Tabelle 5:

**CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale ausgewählter Fahrwiderstandsreduktionen, Angaben in Prozent**

Gewichtsreduktion	5–10 %
Rollwiderstand	2–5 %
Aerodynamik	1–5 %

Quellen: TNO 2006, CARB 2004, IEA 2005, King 2007

Als letzte wesentliche Größe, die die Fahrwiderstände von Fahrzeugen beeinflusst, ist der Luftwiderstand zu nennen. Durch Optimierungen im Fahrzeugdesign lassen sich der Luftwiderstandsbeiwert und die Frontfläche und damit der Kraftstoffverbrauch von Pkw insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten um bis zu 5 Prozent reduzieren.

Wie Tabelle 5 verdeutlicht, liegt das Potenzial zur Kraftstoffeinsparung bei Maßnahmen zur Reduzierung des Fahrwiderstandes zwischen 1 und 10 Prozent. Das Gesamtpotenzial hat eine Größenordnung von etwa 15 Prozent.

### 2.1.3 Beispiele für aktuelle, effiziente Pkw-Modelle

Im Kontext der aktuellen Klimadebatte bieten bereits viele Hersteller effizientere Pkw-Modelle an. Diese sind unter verschiedenen Labels erhältlich, wie „Efficient Dynamics“, „Ecomotive“, „ECOnetic“, „BlueEfficiency“ und „BlueMotion“. Andere Hersteller kennzeichnen Fahrzeuge, die bestimmte CO<sub>2</sub>-Emissionen unterschreiten, mit Labels wie „AirDream“, „EcoFlex“, „BlueLion“, „eco2“. Die eingesetzten Technologien gehen von Gewichtsreduktion durch Leichtbau und Verzicht auf das Reserverad, über die Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaften durch „Tieferlegen“, Luftklappensteuerung und Heckspoiler, hin zu Leichtlaufreifen, Leichtlaufölen, verlängerte Getriebeübersetzung, abgesenkte Leerlaufzahl, Start-Stopp-Automatik, Schaltpunktanzeige und Hybridtechnologie. Eine Auswahl von Fahrzeug-

modellen, die gegenüber dem Vorgängermodell oder dem konventionellen Pendant deutliche Verbrauchsreduktionen aufweisen, zeigt Tabelle 6.

Die Beispielfahrzeuge zeigen, dass bereits heute Pkw in Serienanfertigung angeboten werden, die Energieeinsparungen von bis zu 31 Prozent gegenüber dem Vorgängermodell oder dem konventionellen Pendant erreichen – und das teilweise sogar bei höherer Fahrzeugleistung.

Wie gezeigt werden konnte, gibt es zahlreiche technische Maßnahmen, um bei Pkw den Kraftstoffverbrauch deutlich zu reduzieren. Die beschriebenen Maßnahmen sind nicht beliebig kombinierbar und einige Maßnahmen sind nicht addierbar, da sie die gleichen Potenziale erschließen. Dennoch ist das realisierbare Minderungspotenzial erheblich. Die Technologiepakete, die in TNO (2006) für die Modellierungen der Grenzwertvorschläge der Kommission für das Jahr 2012 zu Grunde gelegt wurden, weisen je nach Antriebsart und Pkw-Größenklassen Minderungen von bis zu 35% für Diesel-Pkw und bis zu 45% für Otto-Pkw auf. Bis zum Jahr 2012 sind diese Minderungsraten sicherlich – angesichts der Entwicklungszyklen in der Automobilindustrie – nicht auf die gesamte Fahrzeugflotte der neu zugelassenen Pkw anzuwenden. Die von der Kommission vorgeschlagene, durchschnittliche Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 20 Prozent bis 2012 bezogen auf das Jahr 2005 ist in Anbetracht der zur Verfügung stehenden Effizienzsteigerungstechnologien und der bereits am Markt erhältlichen und angekündigten Pkw-Modelle bis zu diesem Zeitpunkt jedoch umsetzbar. Sollte sich

Tabelle 6:

**Leistung, Verbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen ausgewählter Fahrzeugmodelle und deren Vergleichsmodelle**

Pkw-Modell	Leistung	Verbrauch	CO <sub>2</sub> -Emissionen	CO <sub>2</sub> -Minderung gegenüber Vergleichsmodell
Smart fortwo coupé "pure"	52 kW	4,7 l/100km	112 g/km	
Smart fortwo coupé micro hybrid drive "pure"	52 kW	4,3 l/100km	103 g/km	-8,5 %
Polo Trendline TDI mit PF	59 kW	4,5 l/100km	119 g/km	
Polo BlueMotion	59 kW	3,8 l/100km	99 g/km	-16 %
Seat Ibiza Reference 1.4 TDI	59 kW	4,6 l/100km	120 g/km	
Seat Ibiza Ecomotive 1.4 TDI	59 kW	3,8 l/100km	99 g/km	-17,5 %
Honda Civic 1,4 Comfort	61 kW	5,9 l/100km	139 g/km	
Honda Civic Hybrid 1.3 IMA	70 kW	4,6 l/100km	109 g/km	-22 %
BMW 1er 116i (2007)	85 kW	7,5 l/100km	180 g/km	
BMW 1er 116i (2008)	90 kW	5,8 l/100km	139 g/km	-22,5 %
Lexus GS 430	208 kW	11,4 l/100km	269 g/km	
Lexus GS 450 hybrid	254 kW	7,9 l/100km	186 g/km	-31 %

Quellen: ADAC 2007, eigene Auswertung

der Trend einer zunehmenden Leistungssteigerung umkehren, ist auf Basis der dargestellten Technologien in den nächsten 10 bis 15 Jahren mindestens eine Halbierung des Energiebedarfs aller neu zugelassenen Pkw möglich.

## 2.2 Treibhausgasreduzierungsziele eines CO<sub>2</sub>-Grenzwerts für Pkw

Etwa 67 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Straßenverkehr wurden im Jahr 2005 in Deutschland von Personenkraftwagen verursacht. Eine Verbesserung der Effizienz von Pkw ist damit eine entscheidende Voraussetzung, die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs zu mindern. Dass ausreichend Technologieoptionen zur Verfügung ste-

hen, um deutliche Effizienzsteigerungen bei Pkw zu verwirklichen, konnte im vorangegangenen Abschnitt gezeigt werden. Eine wesentliche politische Maßnahme, um diese Potenziale zu realisieren, ist die Einführung von CO<sub>2</sub>-Grenzwerten für neu zugelassene Pkw.

Am 19. Dezember 2007 hat die Europäische Kommission einen Vorschlag zur Einführung entsprechender Grenzwerte vorgelegt (COM 2007). Die Kommission schlägt vor, im Jahre 2012 einen Grenzwert für fahrzeugspezifische Emissionen in Höhe von 130 g/km im Durchschnitt für alle neu zugelassenen Pkw einzuführen, wobei die Emissionen pro Hersteller erfasst werden sollen. Die Einhaltung des Grenzwertes soll über Abgaben erreicht werden, die gestaffelt aufgebaut sind und pro überschrittenem Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer

für jedes verkaufte Fahrzeug erhoben werden sollen (2012: 20 €; 2013: 35 €; 2014: 60 €; ab 2015: 95 €). Der Grenzwert soll gewichtsbasiert implementiert werden. Grundlage hierfür stellt die folgende Formel dar:

$$130 + 0,0457 * (M - 1\,289); M = \text{Fahrzeuggewicht}$$

Es wird zunächst davon ausgegangen, dass das Fahrzeuggewicht (1 289 kg war 2006 das europäische Pkw-Durchschnittsgewicht) nicht zunehmen wird. Diese Annahme wird 2010 überprüft und gegebenenfalls die Berechnungsgrundlage angepasst. Die Formel ist so gestaltet, dass schwere Pkw vergleichsweise mehr CO<sub>2</sub> pro Kilogramm Fahrzeuggewicht reduzieren müssen als leichte. Das soll verhindern, dass Pkw schwerer konstruiert werden, damit sie mehr CO<sub>2</sub> emittieren dürfen. Grundsätzlich ist die Bezugsgröße Gewicht verglichen mit der von einigen Akteuren vorgeschlagenen Bezugsgröße Grundfläche des Pkw diskussionswürdig<sup>5</sup>. Gerade Bezugsgröße und Ausgestaltung der Abgaben stellen Schwerpunkte in der Debatte um die Grenzwertdefinition dar. Aber auch die Höhe des angestrebten Grenzwertes von 130 g/km und das Jahr des Inkrafttretens werden von den verschiedensten Akteuren noch diskutiert. Im Rahmen des Vorschlages der EU-Kommission ist zusätzlich zu dem Grenzwert von 130 g/km im Jahr 2012 die Prüfung einer Fortschreibung auf 95 g/km im Jahre 2020 angekündigt, um den Herstellern eine langfristige Planungssicherheit zu gewährleisten.

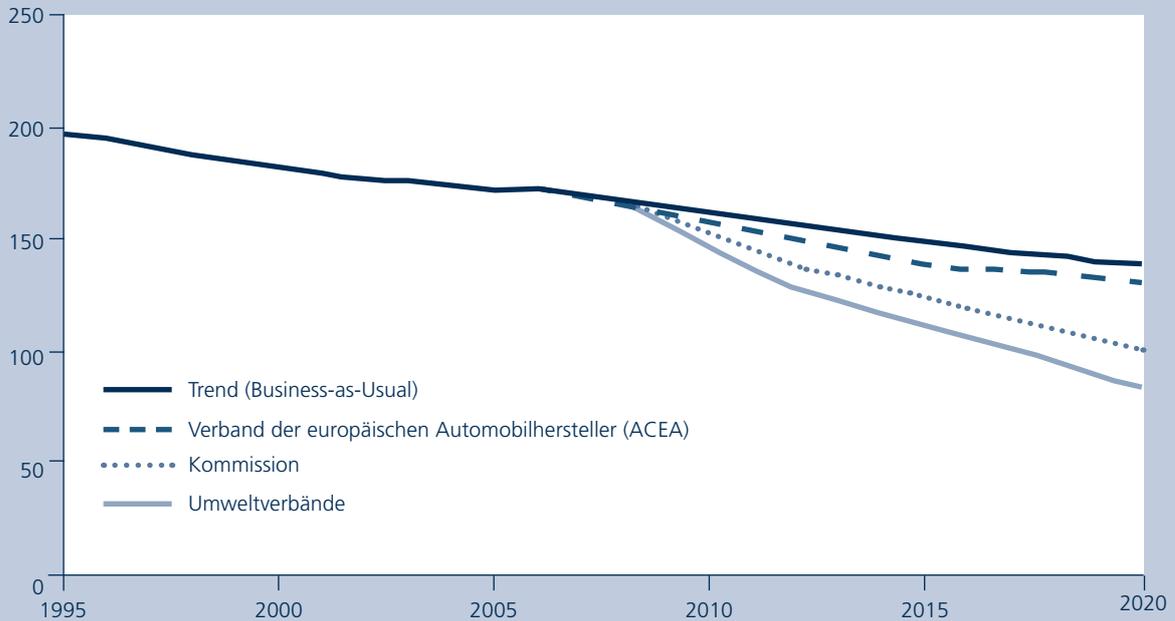
Im Zusammenhang mit dem von der Kommission vorgeschlagenen Grenzwert werden zwei gegenläufige Positionen immer wieder thematisiert. Laut ACEA, dem Verband der europäischen Automobilhersteller, ist der geforderte Wert erst im Jahre 2015 erreichbar (ACEA 2007). Umweltverbände fordern dagegen Effizienzsteigerungen um 25 Prozent und 50 Prozent und damit einen Grenzwert im Jahr 2012 von 120 g/km und eine

Verschärfung auf 80 g/km im Jahr 2020, um die Klimaschutzziele auch wirklich zu erreichen. Um aufzeigen zu können, welchen Minderungsbeitrag bezüglich der Treibhausgasemissionen diese verschiedenen Grenzwertvorschläge leisten können, werden im Folgenden die Minderungspotenziale im Vergleich zu einer Trendentwicklung, bei der keiner der diskutierten Grenzwerte eingeführt wird, berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass die Grenzwerte im Durchschnitt über die Neufahrzeugflotte erreicht werden, unabhängig von der Bezugsgröße und von der Höhe und der Wirksamkeit der Abgaben bei Nichteinhaltung. Das CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial der Grenzwerte resultiert aus der Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der neu zugelassenen Pkw und deren Fahrleistung verglichen mit der Entwicklung ohne die Einführung eines Grenzwerts.

Um die Minderungen der verschiedenen Grenzwertvorschläge abschätzen zu können, muss zunächst ein Business-as-Usual (BaU)-Szenario definiert werden, in dem kein Grenzwert unterstellt wird. Hierfür wird eine weitere Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der in Deutschland neu zugelassenen Pkw von 1,5 Prozent pro Jahr entsprechend TREMOD angenommen. Die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen des BaU-Szenarios und der Alternativszenarien, basierend auf den verschiedenen, oben aufgezeigten Grenzwertvorschlägen, sind in Abbildung 3 dargestellt. Der Vorschlag der Kommission sieht einen Grenzwert in Höhe von 130 g/km im Jahr 2012 und 95 g/km im Jahr 2020 vor. Die Forderung der ACEA in Höhe von 130 g/km im Jahr 2015 auf EU-Ebene wird, da sie noch nicht über das Jahr 2015 hinaus konkretisiert worden ist, mit einem Prozent jährlicher Effizienzsteigerung ab 2015 fortgeschrieben. Die Umweltverbände fordern einen Grenzwert von 120 g/km in 2012 und 80 g/km im Jahr 2020, der entsprechend im dritten Grenzwertszenario betrachtet wird. Die für die EU geforderten Grenzwerte werden an den

5 Die Wahl des Gewichtes als Bezugsgröße könnte kontraproduktiv in dem Sinne sein, dass Leichtbaumaßnahmen aus dem Portfolio der Effizienzsteigerungsmaßnahmen herausfallen, da zur Gewichtsreduktion kein Anreiz gegeben wird. Auch gibt die Fläche eines Fahrzeuges korreliert über die Fahrzeuggröße den Nutzen besser wieder als das Gewicht.

Abbildung 3:

**CO<sub>2</sub>-Emissionen neu zugelassener Pkw in Deutschland und Prognose für ausgewählte Grenzwerte in g/km**

Quelle: KBA 2006, TREMOD 2006, eigene Berechnung

deutschen Flottendurchschnitt angepasst<sup>6</sup> und es wird davon ausgegangen, dass die Grenzwertvorschläge noch im Jahr 2008 verabschiedet werden und bereits im Jahr 2009 eine Absenkung der Emissionen bewirken. Entsprechend werden die Minderungspotenziale für alle neu zugelassenen Pkw ab dem Jahr 2009 berücksichtigt.

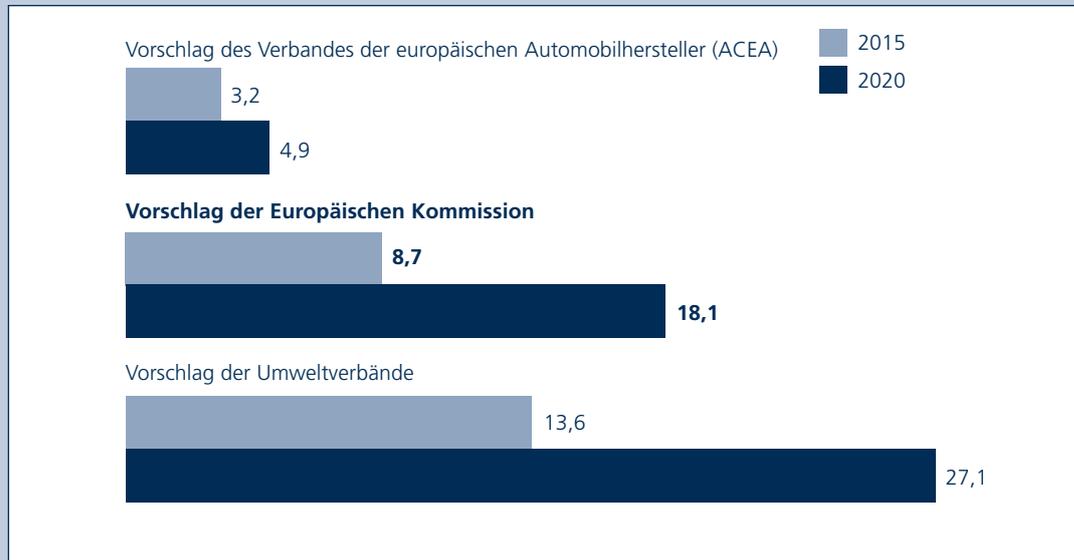
Die offiziell angegebenen CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. Kraftstoffverbräuche von Pkw werden in einem genormten Fahrzyklus ermittelt, dem „Neuen Europäischen Fahrzyklus“ (NEFZ). Studien zeigen, dass diese nicht immer den realen Kraftstoffverbräuchen entsprechen. Oft überschreiten sie den vom Hersteller angegebenen Verbrauch aufgrund verschiedener Einflussfaktoren wie dem individuellen Fahrverhalten, dem Reifendruck, Temperaturunterschieden, dem Einsatz von Kli-

maanlagen, Besetzungsgrade/Zusatzequipment, Reifen und Straßenbelageffekten. In TREMOD ergibt sich damit ein Kraftstoffverbrauch, der durchschnittlich etwa 7 Prozent höher liegt als der im Prüfzyklus ermittelte. Diese 7 Prozent werden bei den Berechnungen berücksichtigt.

Um umfassend das Treibhausgas-Minderungspotenzial ermitteln zu können, das durch die Einführung besagter Grenzwerte erreicht werden kann, und dieses auch in Bezug zu dem Minderungspotenzial von Biokraftstoffen setzen zu können, müssen neben den direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen auch die weiteren treibhausgasrelevanten Emissionen, wie Methan und Lachgas, bezüglich ihrer Treibhausgaswirkung berücksichtigt und die Kraftstoffvorketten mit in die Überlegungen einbezogen werden. Daher wird auf der Basis der

<sup>6</sup> Da der deutsche Durchschnitt der CO<sub>2</sub>-Emissionen der neu zugelassenen Pkw deutlich über dem europäischen Mittel liegt, werden die Grenzwertvorschläge, die auf den gesamten europäischen Raum bezogen sind, auf den deutschen Durchschnitt übertragen. Das bedeutet 139 bzw. 101 g/km für den Kommissionsvorschlag, 139 g/km für die Forderung von ACEA im Jahr 2015 und für die Forderungen der Umweltverbände 128 und 85,5 g/km.

Abbildung. 4:

**Treibhausgasminderungspotenziale ausgewählter Grenzwerte für 2015 und 2020, in Mt CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Jahr**

Quelle: eigene Berechnungen

CO<sub>2</sub>-Emissionen der neu zugelassenen Pkw und der Berücksichtigung des realen Verbrauchs zunächst der Energieverbrauch der neu zugelassenen Pkw ermittelt und mit den entsprechenden Treibhausgasemissionen aus dem Entwurf der Biomassenachhaltigkeitsverordnung für Otto- und Dieselmotoren verknüpft (BioVO 2007). Auf dieser Basis können die Minderungspotenziale der Treibhausgasemissionen inklusive der Kraftstoffvorkette für die unterschiedlichen Grenzwertvorschläge berechnet werden.

Die Abbildung 4 zeigt die Minderungspotenziale für die Grenzwertszenarien basierend auf dem Vorschlag der Europäischen Kommission mit 130 g/km in 2012 und 95 g/km in 2020, dem Vorschlag der europäischen Automobilhersteller

mit 130 g/km in 2015 und dem Vorschlag der Umweltverbände mit 120 g/km in 2012 und 80 g/km in 2020 im Vergleich zum Business-as-Usual-Szenario für Deutschland.

Abbildung 4 verdeutlicht, dass eine Verschiebung der für 2012 geforderten Einführung des Grenzwertes 130 g/km um drei Jahre das Minderungspotenzial bereits im Jahr 2015 um fast zwei Drittel reduziert. Durch die Einführung eines Grenzwertes für 2020 entsprechend dem Kommissionsvorschlag (95 g/km) können im Jahr 2020 rund 18 Mt Treibhausgasemissionen eingespart werden. Wird der Grenzwert 130 g/km in 2015 eingeführt (ACEA) und mit einem Prozent pro Folgejahr weiter abgesenkt, so liegen die Minderungspotenziale der Treibhausgasemissionen

7 Die Annahmen für die Anzahl der Neuzulassungen, die Nutzungsdauer und die Fahrleistungen der Pkw werden von den TREMOD-Daten abgeleitet. Bei den Fahrleistungen wird berücksichtigt, dass Pkw unterschiedlichen Alters unterschiedliche jährliche Fahrleistungen haben. Das heißt, ein Pkw, der 10 Jahre alt ist, legt im Durchschnitt geringere Strecken zurück als ein neu zugelassener Pkw. Auch werden in den Betrachtungen die durchschnittlichen Nutzungsdauern berücksichtigt. So fahren beispielsweise im Jahr 2020 nicht mehr alle im Jahr 2010 neu zugelassenen Pkw. Grundsätzlich wird angenommen, dass sich gegenüber dem Business-as-Usual-Szenario die Fahrleistung aufgrund der geringeren Kraftstoffverbräuche durch die einzuführenden Grenzwerte nicht ändert.

Tabelle 7:

**CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale ausgewählter Szenarien für den deutschen Straßenverkehr, Angaben in Prozent**

Jahr	Vorschlag der Europäischen Kommission	Vorschlag der europäischen Automobilindustrie	Vorschlag der Umweltverbände
2015	4,8%	1,8%	7,5%
2020	10,1%	2,7%	15,1%

Quellen: eigene Berechnungen

im Jahr 2020 bei nur knapp 5 Mt. Mit Minderungen von 13,6 Mt in 2015 bzw. 27,1 Mt in 2020 hat der Grenzwertvorschlag der Umweltverbände das höchste Minderungspotenzial.

Bezogen auf die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs (siehe Tabelle 7) können die beschriebenen Pkw-Grenzwerte im Jahr 2020 die Emissionen um 10,1 Prozent, 2,7 Prozent bzw. 15,1 Prozent reduzieren.<sup>8</sup>

Blickt man über das Jahr 2020 hinaus und nimmt an, dass nach 2020 keine weitere Effizienzsteigerung – weder im Business-as-Usual-Szenario noch in den Grenzwertszenarien – realisiert werden würde, dann lägen die Minderungspotenziale im Jahr 2030 entsprechend dem Vorschlag der europäischen Automobilhersteller bei rund 3 Prozent, für das Grenzwertszenario der Europäischen Kommission lägen sie bei rund 17 Prozent und für das Grenzwertszenario der Umweltverbände bei etwa 42 Prozent bezogen auf den Straßenverkehr. Das verdeutlicht, dass auch langfristig die Höhe und das Jahr des Inkrafttretens des Grenzwertes einen wesentlichen Einfluss auf die Minderungspotenziale der Treibhausgasemissionen haben.

### 2.3 Exkurs: Alternative Antriebskonzepte

Jenseits der dargelegten Potenziale zur Effizienzsteigerung von konventionellen Verbrennungsmotoren werden derzeit alternative Antriebskonzepte für die Zukunft, vor allem die Brennstoffzelle, der reine Elektroantrieb und Plug-In-Hybridantriebe, diskutiert.

Brennstoffzellen wandeln Wasserstoff chemisch in Wasser um, wobei gleichzeitig elektrische Energie freigesetzt wird, die dann einen Elektromotor antreibt. Für Brennstoffzellenfahrzeuge werden Energieeinsparungen gegenüber vergleichbaren Otto-Pkw, je nachdem ob diese mit einer Batterie und Bremsenergieerückgewinnung konzipiert sind, mit 58 bis 68 Prozent angegeben (CONCAWE 2007, Kolke 2004). Hinzu kommt, dass außer Wasser keine direkten Emissionen entstehen. Verschiedene Automobilhersteller haben bereits Prototypen für Pkw und Busse im Testbetrieb auf der Straße. Serienfahrzeuge werden unter anderem wegen der derzeit noch unrentabel hohen Kosten voraussichtlich noch Jahre auf sich warten lassen. Auch ist die optimale Speicherung des Wasserstoffs im Fahrzeug noch Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Hier müssen Gewicht und Volumen der Tanksysteme noch optimiert werden, um die

<sup>8</sup> Werden als Basis nicht die Treibhausgasemissionen des gesamten Straßenverkehrs, sondern nur die des Pkw-Verkehrs genutzt, liegen die Minderungspotenziale bei etwa 15,5%, 4,2% und 23,2%.

angestrebten Reichweiten bei verträglichem Tankvolumen und -gewicht zu erzielen. Der Zielwert mit einer Reichweite von 500 km liegt deutlich über dem für Batterie-elektrische Fahrzeuge, so dass Brennstoffzellenfahrzeuge gerade in den höheren Fahrzeugsegmenten mit höheren Fahrleistungen zukünftig als eine interessante Option angesehen werden können. Zusätzlich muss jedoch berücksichtigt werden, dass zunächst eine kostenintensive Wasserstoffinfrastruktur aufgebaut werden muss, was – wie sich auch beim Erdgas gezeigt hat – nur aufwendig zu realisieren ist. Nur wenn keine Nutzungseinschränkungen bestehen, können Brennstoffzellenfahrzeuge gegenüber den konventionell angetriebenen Fahrzeugen konkurrenzfähig werden. Ausschlaggebend für eine Bewertung von Brennstoffzellenfahrzeugen bezüglich der Klimawirksamkeit ist der Herstellungspfad des eingesetzten Wasserstoffs. Brennstoffzellenfahrzeuge weisen nur dann über die gesamte Kraftstoffkette besonders günstige Treibhausgasemissionen auf, wenn der Wasserstoff regenerativ entweder elektrolytisch aus erneuerbarem Energien-Strom oder aber aus Biomasse hergestellt wird, wodurch eine Nutzungskonkurrenz zum stationären Sektor entsteht. Eine direkte Verwendung des erneuerbaren Stroms wird voraussichtlich in den nächsten Jahrzehnten ökologisch und ökonomisch effizienter und eine breite Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen aufgrund des weiteren Entwicklungsbedarfes vor 2020 nicht zu erwarten sein.

Plug-In-Fahrzeuge stellen eine Weiterentwicklung des Hybridkonzepts dar. Durch den Einsatz eines leistungsfähigeren Energiespeichersystems wird ein rein-elektrisches Fahren über eine größere Reichweite gewährleistet. Die Ladung der Batterie erfolgt dabei nicht nur über Bremsenergieerückgewinnung und den Verbrennungsmotor im Fahrbetrieb, sondern zusätzlich stationär über das Stromnetz. Durch den höheren Fahranteil im elektrischen Betrieb können wesentlich höhere Verbrauchsreduktionen als bei reinen Hybridfahrzeugen erreicht werden, da der Verbrennungsmotor mit seinem schlechteren Wirkungsgrad nur im Bedarfsfall – bei hoher Fahrgeschwindigkeit oder geringem Batterieladestatus – hinzugeschaltet wird. Noch existieren nur erste Demons-

trationsfahrzeuge mit Plug-In-Hybrid-Antrieb, da insbesondere die Batterieanforderungen bisher nicht erfüllt werden können. Die im Vergleich zu Hybridfahrzeugen wesentlich höhere erforderliche Energiekapazität schließt den Einsatz von NiMH-Batterien für Plug-In-Hybride mit größerer Reichweite aufgrund der geringen Energiedichte aus. Eine alternative Speichertechnologie ist die Lithium-Ionen-Batterie mit wesentlich höherer Energiedichte. Hemmnisse für eine Markteinführung stellen vor allem die hohen Zusatzkosten durch die leistungsstärkere Batterie und die erforderte Lebensdauer des Speichersystems dar. Die technologische Marktreife von Plug-In-Fahrzeugen ist damit im Wesentlichen von den Fortschritten in der Entwicklung von Hochenergiebatterien abhängig. Experten rechnen mit der Einführung von Kleinserien innerhalb der nächsten 5 Jahre und der Profilierung einzelner Hersteller in diesem Fahrzeugsegment in den Folgejahren. Mit der Produktion jährlicher Stückzahlen von über 10 000 wird erst zwischen 2010 und 2015 gerechnet, mit der Massenproduktion von mehr als 100 000 Stück pro Jahr ab 2015 (CARB 2007). Im Wechselspiel mit der zunehmenden Popularität von Hybrid-Fahrzeugen lässt sich jedoch ein zunehmendes Interesse der Hersteller am Plug-In-Konzept konstatieren. Dies kann zu einer früheren Einführung von Fahrzeugen mit vergleichsweise geringer elektrischer Reichweite führen, wenn die entsprechende Infrastruktur zur Verfügung steht (CARB 2007).

Batterie-elektrische Fahrzeuge verzichten gänzlich auf den Einsatz eines Verbrennungsmotors und werden in allen Fahrsituationen elektrisch betrieben. Sie zeichnen sich durch besonders niedrige Energieverbräuche aufgrund des hohen Wirkungsgrads des Elektroantriebs aus. Die größten Defizite bestehen auch hier bei der Energiespeicherentwicklung. Da bei rein Batterie-elektrischen Fahrzeugen bei hohem Leistungsbedarf und hoher Fahrleistung nicht – wie bei hybridisierten Antrieben – auf den Verbrennungsmotor zurückgegriffen werden kann, muss der gesamte Leistungs- und Energiebedarf durch die Batterie gewährleistet werden. Um Minimalanforderungen an Fahrzeugleistung und -reichweite gerecht zu werden, sind damit eine sehr hohe En-

ergie- und Leistungsdichte der Batterie erforderlich. Weiterer Entwicklungsbedarf bei den Batterien besteht darin, deren Zusatzgewicht und Platzbedarf möglichst gering zu halten. Hinzu kommen die noch unrentabel hohen Kosten solcher Batterien. Die weiteren Komponenten, wie Elektromotor und Antriebssystem, sind weitgehend ausgereift und mit konventionellen Antriebssystemen konkurrenzfähig. Um eine Nutzungseinschränkung gegenüber konventionellen Fahrzeugen möglichst gering zu halten, muss zusätzlich ein kostenintensives Netz von Schnellladestationen etabliert werden, um die Ladedauer von mehreren Stunden auf wenige Minuten zu reduzieren. Angesichts der bestehenden Differenz zwischen den Minimalanforderungen an Energiespeichersysteme für den Einsatz in Batterieelektrischen Fahrzeugen und der verfügbaren Energiespeichertechnologie sowie deren hoher Kosten, konnten diese bisher den Markteintritt nicht erreichen. Es werden zwar bereits elektrische Kleinwagen für einen Nischenmarkt produziert, diese entsprechen aber nicht den gewohnten Anforderungen bezüglich der Leistungsmerkmale und der Reichweite. Im Segment der Kleinwagen werden derzeit von mehreren Herstellern Batterie-elektrische Fahrzeuge entwickelt, die in Kleinserien eingeführt werden sollen. Nach CARB (2007) wird bis 2015 mit der Produktion von kleinen Stückzahlen (max. 1 000 pro Jahr) im Segment der Kleinwagen gerechnet. Prognosen zum Einführungszeitpunkt von vollwertigen Batterie-elektrischen Fahrzeugen in Massenproduktion sind angesichts der Unsicherheiten bezüglich der Kosten- und Technologieentwicklung von Batterien nur schwer durchzuführen. CARB (2007) rechnet mit einem jährlichen Produktionsvolumen von 100 000 Fahrzeugen (Massenproduktion) erst ab 2030. Entwicklungsfortschritte der Batterietechnologie, ausgelöst durch eine verstärkte Nachfrage nach Hybrid- und Plug-In-Fahrzeugen, könnten die Entwicklung von Batterie-elektrischen Fahrzeugen jedoch deutlich beschleunigen.

Entsprechend den Wasserstofffahrzeugen ist Plug-In- und Elektrofahrzeugen gemein, dass deren Treibhausgasemissionspotenzial neben der technologiebedingten Effizienzsteigerung wesent-

lich von der Art des bereitgestellten Stroms abhängt. Auch wenn durch den Einsatz des Elektromotors in den diskutierten alternativen Fahrzeugen deutlich höhere Wirkungsgrade als beim konventionellen Verbrennungsmotor erzielt werden, muss der eingesetzte Energieträger (Wasserstoff bzw. Strom) regenerativ erzeugt werden, damit diese Fahrzeugkonzepte einen wesentlichen Durchbruch beim Klimaschutz hervorrufen können. Neben dem weiteren Entwicklungsbedarf von reinen Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen, der eine breite Markteinführung auch unter Kostengesichtspunkten in den nächsten 10 bis 15 Jahren nicht erwarten lässt, muss damit für die Bereitstellung des Stroms beziehungsweise des Wasserstoffs auch die Frage der Nutzungskonkurrenz um die regenerativen Quellen in Bezug auf die stationäre Energienachfrage gestellt werden beziehungsweise wie der zusätzliche Bedarf an regenerativer Energie gedeckt werden kann.

## 2.4 Technologien zur Effizienzsteigerung von schweren Nutzfahrzeugen

Den zweiten wesentlichen Anteil an den klimarelevanten Emissionen des Straßenverkehrs haben mit rund 30 Prozent die schweren Nutzfahrzeuge. Deren Beitrag ist umso brisanter, da gerade für diesen Bereich deutlich ansteigende Fahrleistungen prognostiziert werden. Die Steigerung der Effizienz von schweren Nutzfahrzeugen ist also maßgeblich, um die Treibhausgasemissionen des gesamten Straßenverkehrs auf ein verträglicheres Maß zu reduzieren. Die technischen Maßnahmen sind denen des Pkw sehr ähnlich. Auch hier kann zunächst beim Motor angesetzt werden. Unter die Motorenoptimierung fallen Verbesserungen an allen Komponenten des Motors, die nicht mit der Einführung neuer Fahrzeugtechnologien verbunden sind, wie beispielsweise geringere bewegte Massen im Motor, reduzierte Reibung, optimierte Einspritzpumpen, variable Ventilsteuerung, eine effizientere Verbrennung durch 2-stufige Motorenaufladung bei Dieselmotoren und eine Optimierung der Nebenaggregate. Durch eine verbesserte Motoreffizienz können mittelfristig 8 Prozent Kraftstoff eingespart werden.

Hierbei ist die SCR-Technologie mit berücksichtigt, bei der es sich zwar um eine Abgasnachbehandlungstechnologie zur Reduzierung der NOx-Emissionen handelt, diese aber zusätzlich Spielräume bei der innermotorischen Verbrauchsoptimierung eröffnet (IVECO 2003).

Weitere Minderungspotenziale liegen im Einsatz automatisierter Schaltgetriebe und stufenloser Getriebe. Automatisierte Getriebe kommen mittlerweile von der Klasse der leichten Nutzfahrzeuge bis hin zu schweren Nutzfahrzeugen zum Einsatz. Der Kraftstoffverbrauch konnte dadurch bei Kleintransportern um 5 Prozent gesenkt werden. Eine optimale Kopplung von stufenlosem Getriebe und Motor ermöglicht Minderungspotenziale von 2 bis 8 Prozent (Ellinger 2001).

Für schwere Nutzfahrzeuge, die prioritär in der Güter-Feinverteilung eingesetzt werden und deren Fahrsituation viele Start-Stopp-Vorgänge aufweist, sind Hybridantriebe eine effiziente Technologie, um den Kraftstoffverbrauch deutlich zu reduzieren. Entsprechend der hohen Effizienzsteigerungspotenziale der Hybridtechnik im Stadtverkehr werden von mehreren Herstellern mittlerweile insbesondere leichte bis mittelschwere Nutzfahrzeuge mit Hybridantrieben ent-

wickelt. Die meisten Hybridnutzfahrzeuge befinden sich jedoch noch in der Erprobungsphase. Hersteller geben für städtische Fahrsituationen ein Minderungspotenzial von durchschnittlich etwa 30 Prozent an (VOLVO 2006, DAIMLER 2006, MAN 2006).

Im Fernverkehr werden aufgrund der Rückgewinnung der Bremsenergie auf Mittelgebirgstrecken 4 bis 6 Prozent Kraftstoffeinsparung für möglich gehalten. Außerdem könnten mit einem Hybridanteil Nebenantriebe und Verbraucher (wie Standklimaanlage und Kühlaggregate) effizienter betrieben werden. Beim Fernverkehr-Lkw könnte das Downsizing-Prinzip durch die elektromotorische Unterstützung des Dieselantriebs weitere Verbrauchsvorteile erzielen (DVZ 2008).

Am Fahrzeug selber können weitere Potenziale durch eine Minderung des Fahrzeuggewichtes, eine Reduzierung des Rollwiderstandes und eine Verbesserung der Aerodynamik erschlossen werden. Das Fahrzeuggewicht spielt bei Lkw eine besondere Rolle, da durch dessen Reduzierung zusätzliche Zuladungsspielräume geschaffen werden können. Einen Überblick über die beim Lkw möglichen technischen Optionen zur Kraftstoffverbrauchsreduktion zeigt die folgende Tabelle 8.

Tabelle 8:

#### CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale ausgewählter Maßnahmen für schwere Nutzfahrzeuge, Angaben in Prozent

Motorenoptimierung	4–8 %
SCR-Technologie	4–7 %
Start-Stopp-Automatik	5–8 %
Vollhybrid	8–30 %
Getriebeoptimierung	2–8 %
Gewichtsreduktion	3–5 %
Rollwiderstand	3–7 %
Aerodynamik	3–7 %

Quellen: ADM 2007, ITR 2005, IVECO 2003, Tretow 2004, VTT 2006, VerkehrsRundschau 2007, IVECO 2007, HUCHO 2005, Ellinger 2001, DAIMLER 2007, AutoMotor 2007, VOLVO 2006, Handelsblatt 2006, MAN 2006, LOGISTIK 2007, DAIMLER 2006, MAN 2006

Bis zu 10 Prozent Verbrauchseinsparungen bei schweren Nutzfahrzeugen können vergleichsweise einfach realisiert werden (VTT 2006). Mit einem weiter gefassten Ansatz kann bei Lkw aber durchaus ein Minderungspotenzial von 32 Prozent erschlossen werden (Friedrich 2007).

Im Gegensatz zu Pkw existiert in Europa für schwere Nutzfahrzeuge kein genormter Fahrzyklus, in dem der Kraftstoffverbrauch und damit auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen vergleichbar erhoben werden. Derzeit werden alle Emissionen nur für den Motor selbst ermittelt, auf das ganze Fahrzeug können keine Rückschlüsse gezogen werden. Das erschwert auch eine Berechnung von Minderungspotenzialen für schwere Nutzfahrzeuge. Die Europäische Kommission diskutiert aktuell die Möglichkeiten, eine Methode zu entwickeln, mit deren Hilfe für das gesamte Fahrzeug Verbrauchswerte und Emissionen abgeleitet werden können. Grundsätzlich ist es möglich, den

Kraftstoffverbrauch für einen gesamten Lkw auf der Basis der Motorenmessungen zu modellieren. So werden beispielsweise in Japan die CO<sub>2</sub>-Emissionen für ein genormtes Fahrzeug auf der Basis der Motorendaten modelliert. Allerdings – denn es ist ein genormtes Fahrzeug – können Maßnahmen zur Effizienzsteigerung am Fahrzeug selbst, wie beispielsweise eine Optimierung der Aerodynamik, mit dieser Methode nicht berücksichtigt werden. Gegenwärtig ist nicht absehbar, ob ein solches Verfahren auch in Europa zum Tragen kommen wird; grundsätzlich ist es aber notwendig, um auf deren Basis Maßnahmen wie eine CO<sub>2</sub>-bezogene Kraftfahrzeugsteuer oder aber CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für neu zugelassene Fahrzeuge umzusetzen, die Anreize geben, die Effizienzpotenziale weitreichend auszuschöpfen – angesichts der stark steigenden Fahrleistungen im Güterverkehr hat dies eine besondere Relevanz.

### 3. Einsatz von Biokraftstoffen

Die EU hat sich zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2010 einen Anteil von 5,75 Prozent und im Jahr 2020 einen Anteil von 10 Prozent Biokraftstoff am Gesamtkraftstoffaufkommen abzusetzen. Die Bundesregierung hat daraufhin ein entsprechendes Biokraftstoffquotengesetz verabschiedet, das die Beimischung von Biokraftstoffen zu den konventionellen, fossilen Kraftstoffen gesetzlich vorschreibt. Hierin wird die Mineralölwirtschaft seit dem 1. Januar 2007 verpflichtet, einen gesetzlich bestimmten Mindestanteil (Quote) des Kraftstoffes in Form von Biokraftstoffen auf dem deutschen Markt abzusetzen. Eingeführt werden separate Quoten für Diesel und Benzin, wobei sich die Quoten auf den energetischen Anteil des Kraftstoffs beziehen. Mit diesem Biokraftstoffquotengesetz wurde die Bundesregierung zusätzlich ermächtigt, Nachhaltigkeitsanforderungen für Biokraftstoffe, die auf die Biokraftstoffquote angerechnet werden können, festzulegen. Diese sogenannte „Nachhaltigkeitsverordnung“ für Biokraftstoffe wurde als Regierungsentwurf am 5.12.2007 beschlossen (BioNV 2007). Parallel wird derzeit die europaweite Einführung von Nachhaltigkeitsanforderungen für (heimische und importierte) Biokraftstoffe diskutiert; ein entsprechender Entwurf wurde im Januar 2008 vorgelegt und ist aktuell in Verhandlungen zwischen Europäischem Rat und Parlament.

Die Nachhaltigkeit der Biomasse – als Energieträger zur Strom- und Wärmebereitstellung, als Biokraftstoff, als Rohstoff und als Nahrungs- und Futtermittel – ist eine der zentralen Herausforderungen für die nachhaltige Ressourcennutzung. Es geht dabei nicht mehr allein um die Nutzungskonkurrenzen von Bioenergie oder Biokraftstoffen, sondern um das gesamte Biomasseaufkommen für alle Nutzungszwecke. Zudem ist

die Bedarfsentwicklung – und hier insbesondere die Effizienz der Nutzung in verschiedenen Sektoren – mit zu berücksichtigen. Dementsprechend sind der internationale Handel mit Biomasse, die Rückwirkungen auf Klima und Umwelt sowie Wirtschaft und Soziales wichtige Teilfragen einer konsistenten, übergreifenden Politik. Vor diesem Hintergrund sind die folgenden Ausführungen zu verstehen, die aus Gründen der Fragestellung allein auf die Treibhausgasemissionen bei der Biokraftstoffnutzung abstellen. Es muss jedoch im Blick behalten werden, dass einer unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten vertretbaren Ableitung von Zielen für Biokraftstoffe keine isolierte Betrachtung allein der Treibhausgasbilanz zugrunde liegen darf, sondern sich eingedenk der komplexen Wechselwirkungen auch mit anderen Zielen auseinandersetzen muss.

#### 3.1 Biokraftstoffoptionen

Die Möglichkeiten, Kraftstoffe aus Biomasse bereitzustellen, sind vielfältig. Zu den derzeit eingesetzten Biokraftstoffen, der so genannten ersten Generation, zählen Biodiesel und Bioethanol. In Deutschland wird Biodiesel hauptsächlich auf Basis von Raps hergestellt und dem Dieselmotorkraftstoff bereits beigemischt bzw. in reiner Form verwendet. Konventionelles Bioethanol basiert auf Zuckerrüben und Getreide, vor allem Weizen. Die Technologien zur Herstellung dieser Biokraftstoffe sind nahezu ausgereift; Optimierungspotenziale bieten vor allem noch die Reduzierung des Düngemittelsatzes, die Ertragssteigerung je Hektar und die Verwertung der Koppelprodukte. Wegen der geringen Klimateffizienz und der spezifischen Anbaubiomasse<sup>9</sup> der Biokraftstoffe der

9 Unter Anbaubiomasse versteht man Biomasse, die – im Gegensatz zu beispielsweise Restholz und biogenen Abfallstoffen – extra angebaut werden muss, so wie Raps oder Weizen.

ersten Generation werden diese nur als eine Übergangslösung betrachtet. Eine interessante Alternative stellt Biogas dar, das mit ähnlichen Spezifikationen wie Erdgas hergestellt werden kann. Vorteil ist, dass dieses problemlos in konventionellen Erdgasfahrzeugen verwendet oder aber in beliebigen Mengen dem Erdgas beigemischt werden kann. Auch hier ist die Verfahrenstechnik ausgereift, da Biogasanlagen bereits in großer Anzahl in Deutschland betrieben werden.

Neben den bereits erprobten Kraftstoffen Biodiesel und konventionellem Bioethanol befindet sich derzeit aufgrund des gestiegenen Interesses und der besonderen Förderung erneuerbarer Energien eine Vielzahl von Verfahren zur Erzeugung von Biokraftstoffen in der Entwicklung, die vor allem auf eine breite Toleranz gegenüber Biomasse unterschiedlichen Ursprungs als Rohstoff abzielen. Insbesondere zwei in der Entwicklung befindliche Verfahren sind hier zu nennen: Die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen, dem so genannten BTL (Biomass to Liquid), das aus Synthesegas über die Vergasung von Biomasse hergestellt wird, und die Erzeugung von Bioethanol über den Aufschluss holz- und halmartiger Materialien und deren anschließender Vergärung. Diese beiden Verfahren befinden sich noch im Stadium der Entwicklung und Demonstration. Sie werden derzeit intensiv verfolgt, da diese Kraftstoffpfade einige deutliche Vorteile gegenüber den bisherigen Herstellungspfaden aufweisen. Ein entscheidender Vorteil dieser neuen Verfahren ist, dass die Auswahl des Rohstoffes nicht auf spezifische Pflanzenarten beschränkt ist, sondern eine breite Palette an Pflanzen zur Verfügung steht, die auch miteinander gemischt werden können. Damit bieten die Biokraftstoffe der zweiten Generation erhebliche Potenziale für die Zukunft. Auch kann der Einsatz fossiler Energieträger voraussichtlich weiter vermindert werden, da bei optimierten Anlagen die für den Prozess benötigte Energie komplett auf Biomasse als Energieträger umgestellt werden kann. Die zweite Generation ist entsprechend vielversprechend, allerdings werden die Kosten gegenwärtig als hoch eingeschätzt.

## 3.2 Minderungspotenziale durch den Einsatz von Biokraftstoffen

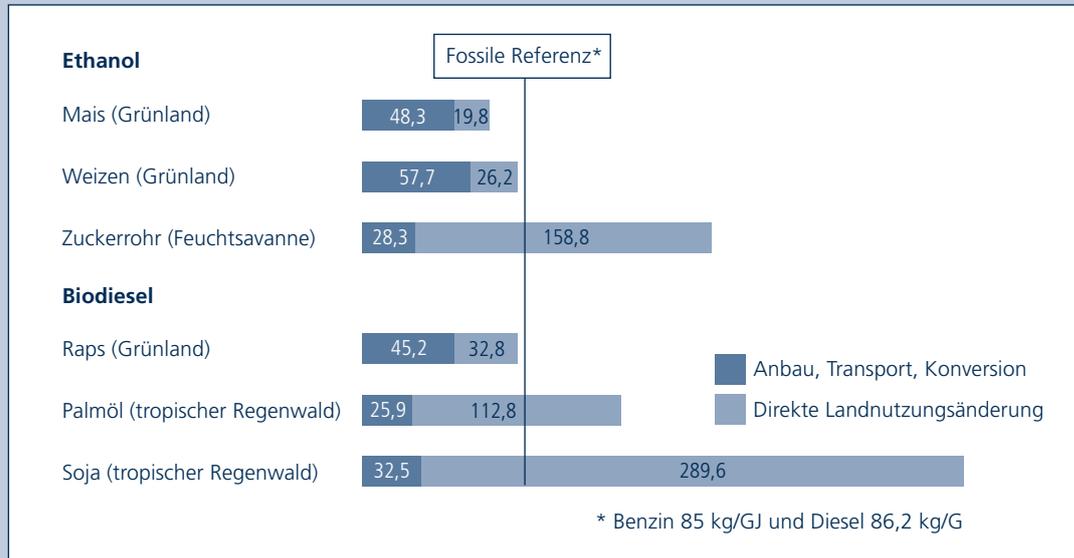
### 3.2.1 Lebenswegbilanzen für Treibhausgasemissionen von Biokraftstoffen

Die generelle Diskussion zu den Treibhausgas-Minderungspotenzialen von Biokraftstoffen stellt wesentlich auf lebenswegbedingte Emissionen ab (life-cycle emissions), d. h. die Bilanz vom Anbau bzw. von der Bereitstellung der Rohstoffe über die Verarbeitung (Kraftstoffherstellung) unter Einbeziehung der Einsatzstoffe (z. B. Dünger, Dieselmotorkraftstoff) und Transporte bis zum Endprodukt. Dabei sind die anfallenden Nebenprodukte wie Rapsextraktionsschrot, Glycerin sowie gegebenenfalls anfallende Überschüsse an Energie zu beachten<sup>10</sup>. Bei der Verwendung von Anbaubiomasse als Rohstoff für biogene Kraftstoffe müssen zusätzlich die Kohlenstoff-Bilanzen anbaubedingter Landnutzungsänderungen (land-use change) berücksichtigt werden. Je nachdem, welche Annahmen zur Landnutzungsänderung getroffen werden, ändert diese erweiterte Bilanzierung die Ergebnisse bisheriger Lebenszyklusanalysen. Im negativen Fall kann durch den Biomasseanbau eine stark kohlenstoffspeichernde Vegetation durch einjährige Energiepflanzen – z. B. Mais oder Weizen – ersetzt werden, womit eine erhebliche zusätzliche CO<sub>2</sub>-Freisetzung einzurechnen ist. Mit dem Beschluss zur Nachhaltigkeitsverordnung zum Biokraftstoffquotengesetz der Bundesregierung und vergleichbaren Vorschlägen der EU-Kommission liegen nun erstmals methodisch abgesicherte Grundlagen vor, mit denen direkte Landnutzungseffekte berechnet werden können (IFEU 2007). Dabei wurden auch sogenannte Default-Daten erstellt, die im Falle einer allgemeinen Betrachtung – ohne Bezug auf bestimmte Anbauflächen – verwendet werden können. Diese Werte sind im Rahmen der Nachhaltigkeitsverordnung zu verwenden, sofern der Biokraftstoffhersteller keine Treibhausgasbilanz für sein Produkt vorlegt. Sie repräsentieren für jeden Schritt der Produktionskette einen vergleichsweise ungünstigen Fall. Damit soll für den Biokraftstoff-

10 Vgl. insbesondere: EMPA 2007; CONCAWE 2007; Fargione et al. 2008; Fehrenbach 2008; Fehrenbach/Fritsche/Giegrich 2008; IFEU 2007; ÖKO 2006a+b; Searchinger et al. 2008; SRU 2007; UNEP/IEA 2008; WWI 2007.

Abbildung 5:

### Treibhausgasemissionen ausgewählter Biokraftstoffe für den gesamten Lebenszyklus inklusive direkten Landnutzungsänderungen, in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent/GJ Biokraftstoff



Quelle: IFEU 2007, eigene Berechnungen

hersteller ein Anreiz zu einer besseren Praxis gegeben werden (BioNV 2007).

In Abbildung 5 sind die Lebenswegbilanzen verschiedener Biokraftstoffarten und deren CO<sub>2</sub>-Emissionen inklusive direkten Landnutzungsänderungen abgebildet. Es zeigt sich, dass durch die Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen Biokraftstoffe wie Ethanol auf Basis von Zuckerrohr oder Biodiesel auf Basis von Soja deutlich schlechtere Treibhausgasemissionsbilanzen aufweisen können als die fossilen Kraftstoffe.

Über die direkten Emissionen aus den Lebenswegen und der direkten Landnutzungsänderung beim Energiepflanzenanbau hinaus können Treibhausgasemissionen auch durch indirekte Landnutzungsänderungen entstehen<sup>11</sup>. Das daraus resultierende Potenzial an CO<sub>2</sub>-Emissionen wird indirekt durch den Biomasseanbau verursacht und ist diesem daher anzurechnen. Die

Höhe der möglichen CO<sub>2</sub>-Emissionen ist dabei je nach den durch die „verdrängte“ Landnutzung bedingten indirekten Effekten auf den Kohlenstoffhaushalt teilweise erheblich. Bei der Nutzung von Abfall- und Reststoffbiomassen sowie der Biomasseanbau auf bisher ungenutzten (z.B. degradierten) Flächen entstehen hingegen keine Verdrängungseffekte und bedingen daher auch kein Risiko für indirekt bewirkte CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Landnutzungsänderungen. Zusätzlich stehen diese Biomasseoptionen nicht in Konkurrenz zum Nahrungs- oder Futtermittelanbau, haben also keine unmittelbaren Effekte auf deren Mengen und Preise. Weiter führen sie auch nicht das Risiko mit sich, durch verdrängte Landnutzung indirekte Schäden an wertvollen Flächen, Biotopen usw. zu verursachen. Bei der Nutzung marginaler oder degradierter Flächen muss dagegen sicher gestellt werden, dass dort keine biodiversi-

<sup>11</sup> Diese indirekten Landnutzungsänderungen entstehen, wenn auf Flächen zum Biomasseanbau vorher eine andere Nutzung – etwa zur Nahrungs- oder Futtermittelproduktion – stattfand, die durch den Biomasseanbau verdrängt wird. Da davon auszugehen ist, dass weiterhin der Bedarf an den vorher produzierten Nahrungs- oder Futtermitteln besteht, wird deren Produktion nun auf andere Flächen verlagert. Diese Flächen können einen hohen Kohlenstoffvorrat aufweisen (z. B. Wälder, Moore), der durch die Nahrungs- oder Futtermittelproduktion reduziert wird.

tätsreichen Lebensräume oder bedrohte Arten nachteilig beeinflusst werden und auch keine sozialen Verdrängungseffekte stattfinden.

Aus diesen Gründen ist für die Bewertung der Kosten und Nutzen von Biokraftstoffen die Differenzierung zwischen Biokraftstoffen aus herkömmlicher Anbaubiomasse und Biomasse, die aus Abfällen, Reststoffen und von ungenutzten Flächen stammt, entscheidend. Die Berücksichtigung bei den Mindeststandards für auf die Quote anrechenbare Biokraftstoffe und das dafür notwendige methodische Vorgehen wird entsprechend derzeit auf nationaler und internationaler Ebene erarbeitet.

### 3.2.2 Treibhausgasreduzierungspotenzial für den Straßenverkehr

Die EU hat sich zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2010 einen Anteil von 5,75 Prozent Biokraftstoffe abzusetzen. Im Jahr 2020 soll der energetische Anteil an Biokraftstoffen dann 10 Prozent betragen. Die Bundesregierung geht in ihrem integrierten Energie- und Klimaschutz-Programm noch einen Schritt weiter und sagt, dass ein Kraftstoffanteil von bis zu 17 Prozent möglich wäre. Im Folgenden werden die Treibhausgasreduzierungspotenziale von zwei Szenarien, eines mit einer Biokraftstoffquote in Höhe von 10 Prozent und eines mit einer Quote in Höhe von 17 Prozent im Jahr 2020, bestimmt. In diesem Zusammenhang ist jedoch anzumerken, dass, wenn parallel die Strom- und Wärmebereitstellung aus Biomasse ebenfalls ansteigt, die Biokraftstoffquoten bis 2020 nur mit Importen möglich sind.

Um Treibhausgasreduzierungen von Biokraftstoffen zu gewährleisten, werden gegenwärtig in Deutschland (Biomassenachhaltigkeitsverordnung) und auf der europäischen Ebene (RES-Richtlinie) Mindeststandards für Biokraftstoffe diskutiert. Durchsetzen könnte sich die Forderung, Biokraftstoff nur auf die Biokraftstoffquote anzurechnen, wenn diese eine festgelegte prozentuale Emissionsreduzierung gegenüber dem fossilen Kraftstoff gewährleisten. In der Diskussion sind Reduzierungen in Höhe von 35 bis 50 Prozent im Jahr 2020. Aus diesem Grund werden zusätzlich zu den Biokraftstoffquoten in den folgenden Berechnungen entsprechende Mindestanforderungen für das Jahr 2010 in Höhe von 35 Prozent und für das Jahr 2020 in Höhe von 50 Prozent berücksichtigt.

Das Treibhausgasreduzierungspotenzial der beiden Szenarien für den Straßenverkehr lässt sich mit Hilfe der Biokraftstoffquote und der Mindestanforderung errechnen. Die Ergebnisse für die zwei Szenarien – mit einer Quote in Höhe von 5,75% in 2010 und 10% in 2020 bzw. 5,75 in 2010 und 17% in 2020 – zeigen, dass Reduktionen von 6,6 Mt bis 8,7 Mt im Jahr 2015 und von 9,0 Mt bis zu 15,2 Mt im Jahr 2020 möglich sind. Tabelle 9 verdeutlicht, dass Biokraftstoffe einen – wenn auch begrenzten – Beitrag zum Klimaschutz leisten können. Bezogen auf die gesamten Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs liegt der Beitrag von Biokraftstoffen – je nachdem welche Quote beschlossen wird – bei maximal 8,5 Prozent Reduzierung im Jahr 2020.

Tabelle 9:

#### Reduktion der Treibhausgasemissionen des deutschen Straßenverkehrs in den Jahren 2015 und 2020 für ausgewählte Biokraftstoffquoten

	in Mt CO <sub>2</sub> -Äquivalent		in %	
	Quote: 2010: 5,75 % 2020: 10,00 %	Quote: 2010: 5,75 % 2020: 17,00 %	Quote: 2010: 5,75 % 2020: 10,00 %	Quote: 2010: 5,75 % 2020: 17,00 %
<b>2015</b>	6,6	8,7	3,6	4,1
<b>2020</b>	9,0	15,2	5,0	8,5

Quelle: eigene Berechnungen

## 4. Zusammenfassende Betrachtung

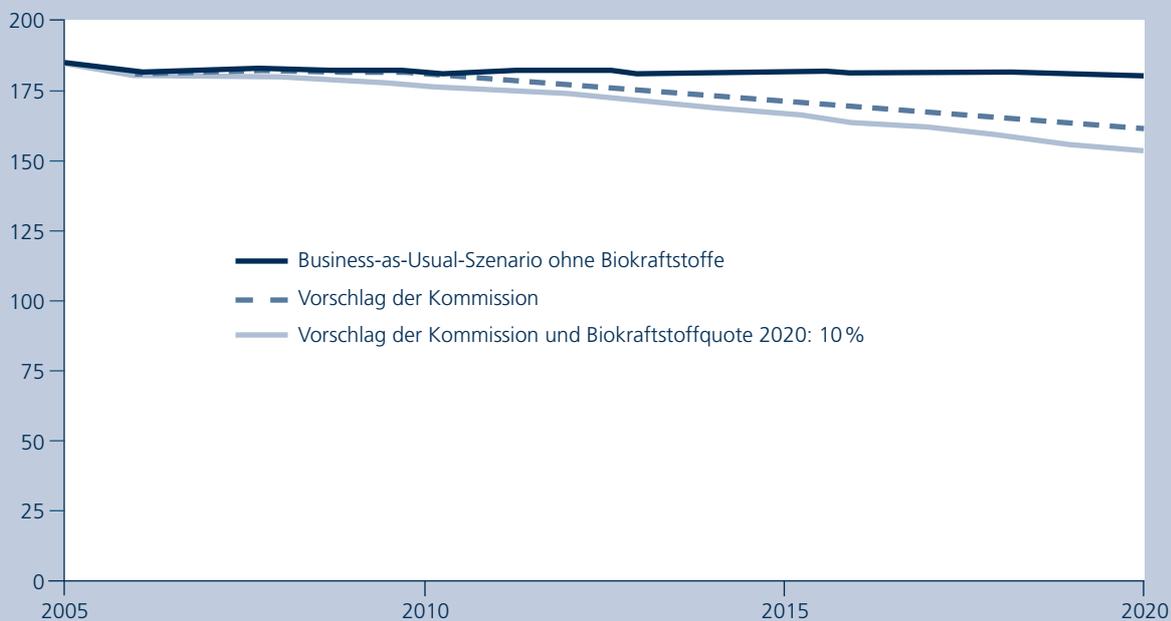
Welchen Beitrag zum Klimaschutz der Verkehrssektor durch die viel diskutierten Optionen „Effizienzsteigerung bei Pkw“ und „Einsatz von Biokraftstoffen“ bis zum Jahr 2020 in Deutschland leisten kann, verdeutlicht Abbildung 6. Hier dargestellt sind die gesamten Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs, inklusive der Kraftstoffvorketten.

Den Berechnungen liegt die Annahme zugrunde, dass durch den Einsatz effizienzsteigernder Technologien bei Pkw der Energiebedarf gemindert wird. Es wird davon ausgegangen, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen neu zugelassener Personenkraftwagen in Deutschland 139 g/km in 2012 und

101 g/km in 2020 nicht überschreiten – was dem Vorschlag der Europäischen Kommission mit 130 g/km in 2012 und 95 g/km in 2020 übertragen auf den deutschen Durchschnitt entspricht.<sup>12</sup> Zusätzlich wird angenommen, dass der Energiebedarf des Straßenverkehrs zu 5,75 Prozent in 2010 und zu 10 Prozent in 2020 durch Biokraftstoffe gedeckt wird.<sup>13</sup> Biokraftstoffe werden bei der Berechnung nur auf die Quote angerechnet, wenn diese im Jahr 2010 eine um mindestens 35 Prozent und im Jahr 2020 eine um 50 Prozent bessere Klimagasbilanz als konventionelle Kraftstoffe aufweisen.<sup>14</sup>

Abbildung 6:

### Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland für ausgewählte Szenarien in Mt CO<sub>2</sub>-Äquivalent



Quelle: Tremod 2006, eigene Berechnungen

<sup>12</sup> Siehe Kapitel 2.2, Fußnote 6

<sup>12</sup> Siehe Kapitel 3.2, Absatz 1

<sup>12</sup> Siehe Kapitel 3.2, Absatz 2

Das Minderungspotenzial der Effizienzsteigerung und des Einsatzes von Biokraftstoff beläuft sich im Jahr 2020 für Deutschland auf rund 26,2 Mt CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Dies ist ein Minderungspotenzial für den Straßenverkehr von knapp 15 Prozent gegenüber dem Business-as-Usual-Szenario.

Die in Tabelle 10 abgebildeten Ergebnisse zeigen, dass eine verbindlich vereinbarte Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen neu zugelassener Pkw ein ganz entscheidendes Instrument ist, die technisch möglichen Kraftstoffeinsparpotenziale zumindest teilweise zu realisieren und damit die Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs zu reduzieren. Voraussetzung ist eine frühzeitige Festlegung auf einen weiter reduzierten Grenzwert für das Jahr 2020.

Ein Grenzwert für Neuwagen und das damit garantierte Angebot an verbrauchsarmen Fahrzeugen ist allerdings für das Erreichen der Klimaschutzziele alleine nicht ausreichend. Auch die Nachfrage und damit das Käuferverhalten müssen sich entsprechend ändern. Von staatlicher Seite sollten daher weitere Maßnahmen eingeführt werden, um ein Umdenken bezüglich des Fahrzeugkaufs und der Nutzung zu unterstützen. Die Umgestaltung der Kraftfahrzeugsteuer von der Bezugsgröße Hubraum auf CO<sub>2</sub> ist eine wichtige Maßnahme in diesem Zusammenhang. Durch eine progressive Ausgestaltung einer CO<sub>2</sub>-bezogenen Kraftfahrzeugsteuer wird für Verbrau-

cher ein Anreiz geschaffen, verbrauchsärmere Fahrzeuge zu kaufen. Unterstützt würde dies zusätzlich durch eine Änderung der Pkw-Kennzeichnungsverordnung, wenn diese entsprechend der so genannten „Weißen Ware“ vergleichend über Energieeffizienzklassen ausgestaltet wird. Aber nicht nur die neu zugelassenen Pkw sollten adressiert werden. Über Anreizsysteme wie Steuervergünstigungen von besonders verbrauchsarmen Pkw kann eine schnellere Bestandserneuerung die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Pkw-Verkehrs schneller reduzieren. Das heißt aber auch, dass neue Kommunikationsstrategien von allen Seiten – Herstellern, Medien, Regierung – entwickelt und umgesetzt werden müssen, um das Bild von verbrauchsärmeren Pkw in der öffentlichen Meinung attraktiver zu gestalten und deren Akzeptanz zu stärken. Hinzu kommt, dass ein besonders verbrauchsarmer Fahrstil den Kraftstoffverbrauch eines jeden Pkw deutlich reduzieren kann; ein Aspekt, der stärker in der Öffentlichkeit diskutiert werden sollte. Hierzu können Fahrerschulungen, die langfristig eine Einsparung von rund 10 Prozent bewirken, beitragen, wobei deren Nachhaltigkeit durch Kraftstoffverbrauchs- und Schaltanzeigen in den Fahrzeugen unterstützt werden muss. Nur durch eine integrative Umsetzung all dieser Maßnahmen gemeinsam mit der Einführung der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte neu zugelassener Pkw kann der Energiebedarf des Straßenpersonenverkehrs signifikant gesenkt werden.

Tabelle 10:

#### Treibhausgasemissionsminderungspotenziale des Straßenverkehrs durch CO<sub>2</sub>-Grenzwerte von Pkw und Biokraftstoffen in Mt CO<sub>2</sub>-Äquivalent und Prozent vom Straßenverkehr

	CO <sub>2</sub> -Grenzwert nach EU-Kommission In Mt CO <sub>2</sub> -Äquivalent/ <b>in Prozent</b>	Biokraftstoffe nach EU-Quote 2010: 5,75 % und 2020: 10 % In Mt CO <sub>2</sub> -Äquivalent/ <b>in Prozent</b>	CO <sub>2</sub> -Grenzwert und Biokraftstoffe In Mt CO <sub>2</sub> -Äquivalent/ <b>in Prozent</b>
<b>2015</b>	8,7 / <b>4,8</b>	6,0 / <b>3,3</b>	14,4 / <b>7,9</b>
<b>2020</b>	18,1 / <b>10,1</b>	9,0 / <b>5,0</b>	26,2 / <b>14,6</b>

Quellen: eigene Berechnungen

Zusätzlich zu einer Effizienzsteigerung bei Pkw muss diese auch bei schweren Nutzfahrzeugen erreicht werden. Ein Aspekt, der vor allem angesichts des prognostizierten Wachstums des Straßengüterverkehrs äußerst wichtig ist. Dazu muss zunächst eine Methode entwickelt und implementiert werden, die die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Lkw in einem genormten Verfahren erfasst, um auf deren Basis Maßnahmen wie eine CO<sub>2</sub>-bezogene Kraftfahrzeugsteuer oder aber CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für neu zugelassene Fahrzeuge umzusetzen. Nur so können Anreize gegeben werden, auch in diesem Fahrzeugsegment die Effizienzpotenziale weitreichend auszuschöpfen.

Eine drastische Reduzierung des Energiebedarfes ist die Voraussetzung für einen hohen Anteil von Biokraftstoffen. Dies begründet sich zum einen mit der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse, die zur Kraftstoffbereitstellung dienen kann. Zum anderen steigen deren Kosten durch ambitionierte Nachhaltigkeitsstandards, die notwendige Voraussetzung für den Einsatz von Biokraftstoffen sind. Diese Standards müssen, unter Einbeziehung von Landnutzungsänderungen, eine signifikante Minderung der Treibhausgasemissionen von Biokraftstoffen gegenüber vergleichbaren fossilen Energieträgern gewährleisten und eine natur- und sozialverträgliche Landnutzung sicherstellen. Grundsätzliches Ziel muss die Einführung und breite Nutzung von Biokraftstoffen der sogenannten „2. Generation“ sein, da diese sowohl biogene Rest- und Abfallstoffe als auch Nicht-Nahrungsmittelpflanzen als Einsatzmaterial nutzen können und somit deutlich höhere Potenziale bieten bei gleichzeitig signifikant höherer Klimateffizienz. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese fortgeschritte-

nen Kraftstoffe nur zu vergleichsweise hohen Kosten zur Verfügung stehen werden, wobei allerdings bei den erwartbaren Steigerungen der Preise für fossile Kraftstoffe und der zunehmenden „Einpreisung“ von CO<sub>2</sub> auch im Verkehrssektor eine längerfristige Wettbewerbsfähigkeit angenommen werden kann.

Die Berechnungen haben aber auch gezeigt, dass der Verkehrssektor mit fahrzeugtechnischen Maßnahmen an Pkw und dem Einsatz von Biokraftstoffen allein, so wie sie derzeit diskutiert werden, mit knapp 15 Prozent Minderung gegenüber einer Trendentwicklung im Vergleich zu anderen Sektoren nur einen unterdurchschnittlichen Beitrag zu den Klimaschutzzielen der Bundesregierung liefern kann. Soll ein höherer Anteil erreicht werden, ist es notwendig, Maßnahmen anzugehen, die die Verkehrsleistungen deutlich dämpfen. Denn ohne eine Verkehrsverlagerung und -vermeidung sind die für eine nachhaltige Entwicklung notwendigen Reduktionen im Sektor Verkehr langfristig nicht zu erreichen.

Nur durch das Zusammenspiel von technologischen Optionen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs, von Verkehrsverlagerung auf umweltfreundlichere Verkehrsträger und der Vermeidung von Verkehren kann der Energiebedarf im Verkehr so weit gesenkt werden, dass er – langfristig – zu einem hohen Anteil mit regenerativen, über globale Nachhaltigkeitsstandards qualitätsgesicherten Kraftstoffen (ob flüssig, gasförmig oder in Form von Strom) gedeckt werden kann. Zur Erfüllung der Klimaschutzziele, zur Schonung der knapper werdenden Ressourcen sowie zur Sicherung einer nachhaltigen Mobilität müssen alle Handlungsstränge gleichzeitig und konsequent verfolgt werden.

## 5. Literatur

---

- (ACEA 2007): European Automobile Industry United in Approach towards Further Reducing CO<sub>2</sub> Emissions from Cars. Venice 2007.
- (ADAC 2007): Auto-Test Neuwagen 2008; Herausgeber: Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC). München 2007.
- (ADM 2007) ADM: Neue Abgasnormen und Biodiesel.  
<http://www.biodiesel.de/index.php3?hid=010136>
- (AutoMotor 2007) AutoMotor: Mercedes Sprinter mit ECO-Start-Funktion erhältlich. Wien 2007.
- (BioNV2007): Entwurf einer Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Erzeugung von Biomasse zur Verwendung als Biokraftstoff (Biomasse-Nachhaltigkeitsverordnung – BioNachV), [www.bmu.de](http://www.bmu.de), BMU 2007.
- (CARB 2004) CARB (California Air Resources Board) Staff Report: Initial Statement of Reasons for proposed rulemaking, public hearing to consider adoption of regulations to control greenhouse gas emissions from motor vehicles. 2004.
- (COM 2007): Setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to Reduce CO<sub>2</sub> emissions from light-duty vehicles COM (2007) 856 final; 2007/0297 (COD). Vorschlag der Kommission an den Rat und das europäische Parlament. Brüssel 2007.
- (CONCAWE 2007) CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe), EURCAR (European Council for Automotive R&D), JRC (EU Joint Research Center): Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Tank-to-wheels report Version 2c, 2007.
- (DAIMLER 2006) Daimler AG: Mitsubishi Fuso stellt den saubersten Leicht-Lkw der Welt vor. Pressemitteilung. Tokio 2006.
- (DAIMLER 2007) Daimler AG: Mercedes-Benz Sprinter now Available with ECO-Start. Pressemitteilung. Stuttgart 2007.
- (Ellinger 2001) Ellinger, R. et al.: Comparison of CO<sub>2</sub> emission levels for internal combustion engine and fuel cell automotive propulsion systems. Society of Automotive Engineers (SAE) Environmental Sustainability Conference. Graz 2002.
- (DLR 2006): Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik/ Institut für Energie- und Umweltforschung/ Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie: Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe, insbesondere regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Kraftstoff für den mobilen Bereich; UFOPLAN Forschungsvorhaben FKZ 203 45 118; Stuttgart/Heidelberg/Wuppertal.
- (DVZ 2008) Deutsche Verkehrs-Zeitung; Wildhage, K.-J.: „Beim Lkw noch viel sparen“. 2008.
- (EEA 2006) (European Environment Agency) 2006: How much biomass can Europe produce without harming the environment? report by the EEA, Copenhagen.  
[http://reports.eea.europa.eu/eea\\_report\\_2006\\_7/en/eea\\_report\\_7\\_2006.pdf](http://reports.eea.europa.eu/eea_report_2006_7/en/eea_report_7_2006.pdf)
- (EEA 2007) (European Environment Agency) 2007: Estimating the environmentally compatible bio-energy potential from agriculture; EEA Technical Report No 12/2007; Copenhagen [http://reports.eea.europa.eu/technical\\_report\\_2007\\_12/en/Estimating\\_the\\_environmentally\\_compatible\\_bio-energy\\_potential\\_from\\_agriculture.pdf](http://reports.eea.europa.eu/technical_report_2007_12/en/Estimating_the_environmentally_compatible_bio-energy_potential_from_agriculture.pdf)

- (EMPA 2007) (Swiss Federal Institute for Materials Science and Technology) 2007: Life-cycle Assessment of Energy Products: Environmental Impact Assessment of Biofuels – Executive Summary; Zah, Rainer et al.; St. Gallen 2007.
- (EWI/Prognos 2005) Bartels, M., C. Gatzert, D. Lindenberger, F. Müsgen, M. Peek, A. Seeliger, D. Steuber, R. Wissen, P. Hofer, A. Kirchner, J. Scheelhaase, M. Schlesinger: Energiereport IV – Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030. EWI, prognos im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit. Köln, Basel 2005.
- (EWI/Prognos 2006) Lindenberger, F., Bartels, M., A. Seeliger, R. Wissen, P. Hofer, M. Schlesinger: Auswirkungen höherer Ölpreise auf Energieangebot und -nachfrage, Ölpreisvariante der Energiewirtschaftlichen Referenzprognose 2030. EWI, prognos im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit. Köln, Basel 2006.
- (Fargione 2008) Fargione, J. et al. Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt; in: Science vol. 319 (5867), p. 1235–1238, <http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1152747>
- (Fehrenbach 2008a) Fehrenbach, H. The BSO's GHG Accounting Methodology and Default Data; presented at the Brussels Workshop ‚Sustainability requirements for biofuels – German Perspectives‘, January 25, 2008.
- (Fehrenbach 2008b) Fehrenbach, H., Fritsche, U., Giegrich, J. 2008: Greenhouse Gas Balances for Biomass: Issues for further discussion Issue paper for the informal workshop, January 25, 2008 in Brussels.
- (Friedrich 2007) Friedrich, A.: „Unternimmt das Verkehrsgewerbe genug für den Klimaschutz?“, Vortrag im Rahmen des DVZ-Klimagipfels Logistik, 21. November 2007, Berlin.
- (Fritsche 2004) Fritsche, Uwe R. u.a. 2004: Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse; Fritsche, Uwe; Jenseit, W.; Dehoust, G.; Hünecke, K.; Rausch, L.; Schüler, D.; Wiegmann, K (Öko-Institut) Heinz, A.; Hiebel, M.; Ising M.; Kabasci, S.: Unger, Ch. (Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik); Thrän, D.; Fröhlich, N.; Scholwin, F. (Institut für Energetik und Umwelt Leipzig gGmbH); Reinhardt, G.; Gärtner, S.; Patyk, A. (Institut für Energie und Umweltforschung, Heidelberg) Baur, F.; Bemmann, U.; Groß, B., Heib, M.; Ziegler C. (Institut für ZukunftsEnergieSysteme, Saarbrücken), Flake M.; Schmehl M. (TU Braunschweig); Simon S. (TU München), Endbericht des Verbundprojektes, gefördert vom BMU, Berlin/Darmstadt usw. ([www.oeko.de/service/bio](http://www.oeko.de/service/bio)).
- (Fritsche 2008) Fritsche, Uwe R. 2008: Beyond the German BSO: Scope of Further Work on Land-use Related GHG; presented at the Brussels Workshop ‚Sustainability requirements for biofuels – German Perspectives‘, January 25, 2008.
- (Handelsblatt 2006) Handelsblatt; Steuer, H.: Volvo setzt auf Hybrid-Technik für Nutzfahrzeuge. 10.09.2007.
- (Hennenberg 2008) Hennenberg, K., Fritsche, U. 2008: Beyond the German BSO: Scope of Further Work on Bioenergy and Biodiversity; presented at the Brussels Workshop ‚Sustainability requirements for biofuels - German Perspectives‘, January 25, 2008.
- (Hucho 2005) Hucho, W.-H. (Hrsg.): Aerodynamik des Automobils. Vieweg Verlag 2005.
- (IEA 2005) IEA study: Making cars more fuel efficient: Technology for Real Improvements on the Road, IEA 2005.
- (IFEU 2003) Helms, H. et al. (IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung): Energy savings by light-weighting. Heidelberg 2003.
- (IFEU 2007) Institut für Energie und Umweltforschung 2007: Klimagasbilanzen zur Biomassenachhaltigkeitsverordnung (BioNachV) – Erläuterungen zur Berechnung der Default-Werte; Arbeitspapier i.A. des UBA; Heidelberg.
- (IFEU 2007) Knoerr, W. et al.: TREMOD – Neuberechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

- (ITP/BVU 2007) Oeltze, S., Wauer, S., Schwarzlose, I., Bracher, T., Eichmann, V., Ludwig, U., Dreger, C., Lohse, D., Zimmermann, F., Heller, J.: Szenarien der Mobilitätsentwicklung unter Berücksichtigung von Siedlungsstrukturen bis 2050, TRAMP, DIFU, IWH, TU Dresden, omniphon im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Schlussbericht Magdeburg 2006.
- (ITR 2005) Internationale Transport Revue; Melzer, R.J.: Dieserverbrauch deutlich gesenkt. Ausgabe 11/2005. <http://www.itr-online.at/>
- (IVECO 2003) IVECO s.p.A.; Ellensohn, R.: Der Dieselantrieb der Zukunft – CO<sub>2</sub>-neutral und schadstofffrei? 1. ÖPNV-Innovationskongress. Freiburg 2003.
- (IVECO 2007) IVECO s.p.A.; Durelli, E.: IVECO Transport Concept. Workshop on fuel efficiency for HDVs, IEA (International Energy Agency). Paris 2007.
- (JRC 2007) Joint Research Center of the EU 2007 (KBA 2006): Kraftfahrt-Bundesamt. Statistische Mitteilungen, Reihe 1: Fahrzeugzulassungen, Neuzulassungen, Besitzumschreibungen, Löschungen, Bestand. 2006.
- (King 2007): The King Review of low-carbon cars, Part I, Studie des britischen Finanzministeriums (HM Treasury), 2007.
- (Kolke 2004) Kolke, R.: Vergleich der Umweltverträglichkeit neuer Technologien im Straßenverkehr (Dissertation). Magdeburg 2004.
- (MAN 2006) NEOMAN Bus Gruppe: MAN entwickelt Hybridantrieb für Stadtbusse und den Verteilerverkehr. Pressemitteilung. Salzgitter 2006.
- (NESCCAF 2004) „Reducing Greenhouse Gas Emissions from Light-Duty Motor Vehicles“, Northeast States Center for a Clean Air Future 2004.
- (ÖKO 2006) Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V./IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) 2006: Potenziale zur Minderung von Treibhausgas- und Schadstoffemissionen: Integrierte Betrachtung von Kraftstoffen und Antrieben; Wiebke Zimmer u.a.; Gutachten im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung (TAB) des Deutschen Bundestags; Berlin/Darmstadt/Heidelberg 2006.
- (ÖKO 2006a) Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V. 2006a: Stand und Entwicklung von Treibhausgasemissionen in den Vorketten für Erdöl und Erdgas; U. Fritsche/L. Rausch/K. Schmidt; Endbericht i.A. des IWO e.V., Darmstadt 2006.
- (ÖKO 2006b) Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V. 2006b: Life-Cycle Analysis of Renewable and Conventional Electricity, Heating, and Transport Fuel Options in the EU until 2030; Fritsche, Uwe R. et al.; final report for EEA; Darmstadt 2006.
- (ÖKO 2006c) Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V. 2006c: Sustainability Standards for Bioenergy; Fritsche, Uwe R. et al.; prepared for WWF; Darmstadt 2006.
- (ÖKO 2008a) Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V. 2008a: GEMIS (Globales Emissionsmodell integrierter Systeme) Version 4.5; Computermodell und Datenbank des Öko-Instituts, internet-release, Mai 2008 (siehe [www.gemis.de](http://www.gemis.de)).
- (ÖKO 2008b) Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V. 2008b: Life-Cycle Analysis Greenhouse-Gas Emissions of Bioenergy – Background Paper; Fritsche, Uwe R. et al.; prepared for EEA; Darmstadt (forthcoming).
- (ÖKO 2008c) Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V.) 2008c: Ökobilanzierung der Umweltauswirkungen von Bioenergie-Konversionspfaden – Treibhausgasbilanzen; Fritsche, Uwe/Wiegmann, Kirsten; Expertise für den Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU): Darmstadt (in Vorb.).
- (ÖKO 2009) Öko-Institut/IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) 2009: Entwicklung von Strategien zur optimalen Nutzung von biogenen Industrierohstoffen: Nachhaltigkeitsstandards und Indikatoren zur Zertifizierung von Biomasse für den internationalen Handel; UBA-Forschungsvorhaben FKZ 3707 93 100, bis Ende 2009.

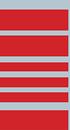
- (Ricardo 2003) Ricardo Consulting Engineers; Owen, N.; Gordon, R.: „Carbon to Hydrogen“ Roadmaps for passenger cars: Update of the study for the Department for Transport and the Department of Trade and Industry. Shoreham 2003.
- (Royal Society 2007) Sustainable Biofuels: Prospects and Challenges; The Royal Society Policy document 01/08; London.
- (Searchinger et al. 2008) Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F. Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, T., Hayes, D., and Yu, T. (2008): Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land Use Change. Science. Published online 2008.
- (SRU 2007) Rat von Sachverständigen für Umweltfragen 2007: Klimaschutz durch Biomasse: Sondergutachten; Berlin [www.umweltrat.de](http://www.umweltrat.de)
- (TNO 2006) Smokers, R. et al. (TNO – Institute for European Environmental Policy, TNO-Institute for European Environmental Policy, LAT-Laboratory of Applied Thermodynamics): Final report „Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO<sub>2</sub>-emissions from passenger cars“. Brüssel 2006.
- (TREMOD 2006) Knoerr, W. et al.: Fortschreibung Daten- und Rechenmodell: Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1960 – 2030. TREMOD (Transport Emission Modell). Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Heidelberg 2006.
- (Tretow 2004) Tretow, H.-J.: Betriebserfahrungen mit Antrieben für Schienen- und Nutzfahrzeuge. Workshop „Heavy Duty Power Systems“. Nürnberg 2004.
- (UBA 2007) Friedrich, A.: Vortrag im Europäischen Parlament am 31.01.2007 „How to make clean cars“, Brüssel 2007.
- (UBA 2003) CO<sub>2</sub>-Minderung im Verkehr, Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes 2003.
- (UNEP 2008) United Nations Environment Programme/IEA (International Energy Agency) 2008: Review of LCA Studies for GHG Emissions of Biofuels; Paris (forthcoming).
- (UNFCCC 2007) Greenhouse Gas Inventory Data from UNFCCC-Detailed data by Party, [www.unfccc.int](http://www.unfccc.int)
- (VOLVO 2006) Volvo, Pressemitteilung: Die Hybridtechnologie steht beim umweltfreundlichen Antrieb von Volvo im Brennpunkt. 15.09.2006.
- (VTT 2006) VTT Technical Research Centre of Finland; Nylund, N.-O.: Fuel savings for heavy-duty vehicles „HDEnergy“, Summary report 2003–2005. Espoo 2006.
- (WBA 2007) Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2007: Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung – Empfehlungen an die Politik; Berlin.
- (WI 2006) Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH: „Klimawirksame Emissionen des PKW-Verkehrs und Bewertung von Minderungsstrategien“, Wuppertal 2006.
- (WWI 2007) WorldWatch Institute 2007: Biofuels for Transportation: Global Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy in the 21<sup>st</sup> Century; Hunt, Suzanne et al.; London (Earthscan).

## Informationen zu den Autoren

---

**Dr. Wiebke Zimmer** studierte Chemie an der Freien Universität Berlin mit anschließender Promotion am Fachbereich Physik der Freien Universität Berlin. Von 2001 bis 2004 war sie Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Umweltbundesamt in der Abteilung Umwelt und Verkehr. Seit 2005 arbeitet sie als Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich Infrastruktur & Unternehmen im Berliner Büro des Öko-Institutes. Schwerpunkte ihrer Arbeit sind vor allem die Bewertung von Antriebssystemen von Fahrzeugen und die Entwicklung von Strategien zur CO<sub>2</sub>-Minderung und Bewertung von entsprechenden Maßnahmen im Transportsektor. Weiterhin beschäftigt sie sich mit der Szenarientwicklung und Emissionsberechnungen im Verkehrsbereich.

**Uwe R. Fritsche** studierte angewandte Physik an der TU Darmstadt und ist seit 1984 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Energie & Klimaschutz des Öko-Instituts. 1991 wurde er Koordinator des Bereichs im Büro Darmstadt. Seine Arbeitsschwerpunkte sind internationale Fragen der Energie und Klimapolitik; Energieszenarien/Modelle; Umweltfragen und Modellierung der Lebenszyklen von Energie-, Stoff- und Verkehrssystemen. Darüber hinaus leitete er nationale und internationale Studien zu nachhaltiger Bioenergie und berät u.a. deutsche Bundesministerien, EU-Kommission, FAO, GEF, GTZ, IEA, UBA, UBS, UNIDO und Weltbank in diesen Fragen. Seit 2006 ist er National Team Leader für die IEA Bioenergy Task 40 (Sustainable Bioenergy Trade).



## Neuere Veröffentlichungen der Abteilung Wirtschafts- und Sozialpolitik

Wirtschaftspolitik

**Globalisierungspanik und Einkommensverteilung**

WISO direkt

Wirtschaftspolitik

**Defizitziel versus Ausgabenpfad –  
Plädoyer für eine berechenbare Haushaltspolitik**

WISO Diskurs

Arbeitskreis Mittelstand

**Auswirkungen eines Mindestlohns auf  
kleine und mittlere Unternehmen  
Eine betriebswirtschaftliche Analyse nach  
Branchen, Betriebstypen und Standorten**

WISO Diskurs

Gesprächskreis Verbraucherpolitik

**Auf dem Weg zum gläsernen Verbraucher?  
Verbraucherschutz bei Kundenkarten und  
RFID-Chips**

WISO Diskurs

Arbeitskreis Innovative Verkehrspolitik

**Verkehrspolitischer Ausbruch aus der Betonwelt!  
Aber durch Nutzerfinanzierung?**

WISO direkt

Gesprächskreis Sozialpolitik

Gesprächskreis Arbeit und Qualifizierung

**Zukunft des Sozialstaats**

- **Bildungs- und Familienpolitik**
- **Beschäftigungs- und Arbeitsmarktpolitik**
- **Sozialpolitik**

WISO Diskurse

Gesprächskreis Arbeit und Qualifizierung

**Flexicurity: Ein europäisches Konzept  
und seine nationale Umsetzung**

WISO Diskurs

Arbeitskreis Arbeit-Betrieb-Politik

**Nokia und der Standortwettbewerb in der EU –  
Institutionen des „Europäischen Sozialmodells“  
sind unterentwickelt**

WISO direkt

Arbeitskreis Dienstleistungen

**Dienstleistungen in Deutschland: besser als ihr  
Ruf, dennoch stark verbesserungsbedürftig!**

Europäische Wirtschafts- und Sozialpolitik

**Europas Sozialpolitik als schwieriger  
Aushandlungsprozess – Akteure und  
Handlungsoptionen unter besonderer  
Berücksichtigung der Arbeitszeitpolitik**

WISO Diskurs

Gesprächskreis Migration und Integration

**Einbürgerung – Rahmenbedingungen, Motive  
und Perspektiven des Erwerbs der deutschen  
Staatsangehörigkeit**

WISO Diskurs

Frauen- und Geschlechterpolitik

**Das Kind am Markt – Die öffentliche Förderung  
gewinnorientierter Kleinkindbetreuung unter  
der Geschlechterperspektive**

WISO direkt

Volltexte dieser Veröffentlichungen finden Sie bei uns im Internet unter

[www.fes.de/wiso](http://www.fes.de/wiso)

