

# **VERGLEICH DER UMWELTVERTRÄGLICHKEIT NEUER TECHNOLOGIEN IM STRASSENVERKEHR**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. (FH) Reinhard Kolke  
geb. am 13. Juli 1968 in Hilden

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Helmut Tschöke  
Prof. Dr. Udo Becker  
Dr. Axel Friedrich

Promotionskolloquium am 29.10.2004



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit ist neben meiner Tätigkeit im Fachgebiet Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr in der Abteilung Verkehr und Lärm des Umweltbundesamtes entstanden. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Tschöke für die Möglichkeit der Erstellung und die hochschulseitige Betreuung der Doktorarbeit. Er hat meine Arbeit stets unterstützt und durch seine anregenden Kommentare außerordentlich bereichert.

Ferner danke ich Herrn Prof. Dr. Udo Becker für seinen fachlichen Rat, sein frühzeitiges Interesse und seine Bereitschaft als zweiter Gutachter diese Arbeit zu betreuen.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Axel Friedrich, der als weiterer Gutachter für diese Arbeit zur Verfügung steht. Den ersten Impuls für diese Studie hat er gegeben, sein unerschöpflicher Ideenreichtum war mir eine wertvolle Hilfe. Ich danke ihm als Leiter der Abteilung Verkehr und Lärm und Herrn Dipl.-Ing. Stefan Rodt als Leiter des Fachgebietes Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr dafür, dass sie durch Anregungen und Diskussionen in hohem Maß zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben und die Erstellung der Arbeit neben meiner Tätigkeit im Umweltbundesamt immer unterstützt haben.

Weiterhin danke ich meinen Kollegen im Fachgebiet und in der Abteilung des Umweltbundesamtes. Ihre fruchtbaren Diskussionen und die Bereitstellung von Informationen und Daten waren mir bei meinen Recherchen eine große Hilfe. Meinem ehemaligen Kollegen Herrn Dr. Matthias Tappe danke ich ebenfalls für seine vielseitigen Anregungen. Besonders möchte ich mich bei Frau Dr. Wiebke Zimmer bedanken. Durch ihre Erfahrung, Unterstützung und hilfreichen Empfehlungen hat diese Arbeit während der Fertigstellung deutlich an Übersicht und Struktur gewonnen. Auch möchte ich Herrn Dr. Hanns-Erhard Heinze besonders danken, der mich als Betreuer in Magdeburg immer gerne hilfreich unterstützt hat.

Ich möchte auch gegenüber dem Institut für Energie und Umweltforschung (ifeu), Heidelberg meinen Dank aussprechen. Deren Mitarbeiter haben mir durch ihren Beitrag zur Brennstoffzellenstudie für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag Anregungen, Daten und Informationen für die Erstellung des Umweltverträglichkeitsvergleiches geliefert. In diesen Dank eingeschlossen sind ebenfalls die Institutionen und Mitarbeiter, die dem ifeu ein Gelingen dieses Beitrages ermöglichten.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Frau Annette Nave und meiner Tochter Marlene bedanken. Die Freude und der Spaß mit meiner Familie haben mir immer viel Kraft für diese Arbeit gegeben.

Berlin, Februar 2004



## Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein neu entwickeltes Modell beschrieben, das die Umwelteigenschaften neuer Antriebe und neuer Energieträger im Straßenverkehr unter Anwendung der Bewertungsverfahren der Ökobilanz und der Kosten-Nutzen-Analyse vergleicht. Die Schwerpunkte der Bewertung liegen auf der Abgas- und CO<sub>2</sub>-Minderung. Mit dem Modell werden Fahrzeuge in bezug auf Gewicht, Verbrauch und weiterer umwelt- und kostenbezogener Eigenschaften bilanziert. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis wird anhand eines statischen Vermeidungskostenansatzes berechnet, bei dem die Kosten auf die Nutzungsdauer der Fahrzeuge bezogen werden und ins Verhältnis zu dem umweltrelevanten Nutzen (z.B. niedrigere Emissionen im Vergleich zum Referenzfahrzeug) über diesen Zeitraum gesetzt werden. Dabei werden 53 unterschiedliche Antriebs-, Treibstoff- und Abgasstandard-Varianten für Pkw der Kleinwagenklasse auf Grundlage ihrer absoluten Umweltwirkungen und ihrer Wirkungen im Vergleich zu einem Referenzfahrzeug (Ottomotor, Saugrohreinspritzung, EURO 4) bewertet. Alle Bewertungen berücksichtigen die Herstellung der Pkw, die Treibstoffherstellung, sowie den Fahrzeugbetrieb.

Die Modellergebnisse führen zu dem Ergebnis, dass es „einen besten Antrieb“ hinsichtlich niedrigster Kosten und gleichzeitiger Nullemissionen nicht geben kann. Die Rangfolgen der 53 Varianten zeigen, dass die aussichtsreichsten Antriebe der Zukunft mit flüssigen Energieträgern betrieben werden und das mit deutlich geringeren Umweltbelastungen zu niedrigeren Kosten als die Referenz. Diese sind verbesserte Benzin- und Dieselmotoren. Die Kraftstoffdirekteinspritzung hat Zukunft, falls die bestehenden Partikelprobleme gelöst werden. Dies kann erst durch eine Abgasnachbehandlung (Diesel) oder durch einen weitgehenden homogenen Betrieb erfolgen. Andernfalls erreichen die Konzepte höhere humantoxische und kanzerogene Emissionen als heutige Fahrzeuge mit Ottomotor. Daneben besitzen Maßnahmen des Downsizings in Kombination mit einer Aufladung attraktive Gestaltungsmöglichkeiten. Für alle Motoren empfiehlt es sich, z.B. neben den bewerteten elektromechanischen Ventiltrieben weitere Maßnahmen kurzfristiger Verbrauchsreduzierungen zu überprüfen. Auch umsetzbare Lösungsmöglichkeiten, wie die Verwendung von Leichtlaufreifen und Leichtlaufölen, besitzen durch ihre hohe Kosteneffizienz trotz ihres geringen spezifischen Emissionsminderungspotentials bei breiter Einführung ein nicht zu vernachlässigendes Potential, um Klimagasemissionen zu reduzieren. Die Verwendung von Methanol oder Dimethylether aus Erdgas in Verbrennungsmotoren erreicht ebenfalls Gesamtemissionsminderungen unter Berücksichtigung der Treibstoffherstellung und deren Nutzung gegenüber heutigen Benzinantrieben ohne Mehrkosten, sofern die Herstellungskosten der Fahrzeuge und die Treibstoffkosten ohne Berücksichtigung der Steuer bilanziert werden. Falls neue Energieträger im Verkehr eingesetzt werden sollen, sind diese genannten Treibstoffe die aus Kosten-Nutzen-Sicht besten Varianten. Beide Treibstoffe können für den monovalenten Betrieb an bestehende Otto- (Methanol) oder Dieselmotoren (Dimethylether) angepasst werden.

Technisch aufwändiger und teurer ist die Herstellung des Druckerdgasantriebes. Er erreicht teilweise Emissionsminderungen zu relativ niedrigen Vermeidungskosten. Das Modell zeigt auch, dass – obwohl die weiteren Verschärfungen der Abgasgrenzwerte, etwa durch einen kalifornischen SULEV oder einen zukünftigen EURO 5 Standard, höhere Kosten verursachen – diese Varianten aus Kosten-Nutzen-Sicht günstiger bewertet werden als gleiche Fahrzeuge mit bestehenden Standards (EURO 4), auch wenn sie als EURO 4-Variante in der Umweltwirkung noch ungünstiger abschneiden als die Referenz.

Die Anwendung der Ergebnisse in Szenariorechnungen zeigt, dass die Umsetzung der kosteneffizientesten Maßnahmen – verbesserte Benzin- und Dieselmotoren, Leichtlaufreifen, Leichtlauföle, Methanol und Dimethylether – gegenüber dem Trendszenario des Pkw-Verkehrs in Deutschland im Jahr 2020 rund 30% der Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emissionen einsparen kann. Werden die Herstellungskosten der Fahrzeuge und die steuerfreien Treibstoffkosten einbezogen, sind in einem solchen Szenario keine Mehrkosten gegenüber einer Fortsetzung der gegenwärtigen Trendentwicklung zu erwarten.



## Summary

In this work, a model was developed for new powertrain systems and new fuels for road vehicles, using life-cycle assessment and cost-benefit analysis. The assessment focuses mainly on exhaust and CO<sub>2</sub> emission reductions. The model involves analysis of vehicles with respect to weight, fuel consumption and further environmental and cost-related characteristics. The cost-benefit ratio is calculated on the basis of a static abatement cost approach, in which the costs over the service life of the vehicles are compared with the environmental benefits (e.g. lower emissions compared to the reference vehicle) over the same period. This model was applied to assess 53 different powertrain, fuel and exhaust standard variants for compact passenger cars with respect to their absolute environmental effects and their effects in comparison with a reference vehicle (petrol engine, intake manifold injection, EURO 4). All evaluations take into account vehicle manufacture, fuel production and vehicle use.

The modelling results show that there is no "best powertrain system" in terms of lowest costs and simultaneous zero emissions. A ranking of the 53 variants shows that the most promising powertrain systems of the future, with significant smaller environmental impacts and lower costs than the reference, are powered with liquid fuels. These will be improved petrol and diesel engines. Direct fuel injection has future potential if the existing particulates problem can be solved. This will only be possible through exhaust after-treatment (diesel) or largely homogenous engine operation. Otherwise these concepts will generate higher human-toxic and carcinogenic emissions than today's petrol-engine vehicles with intake manifold injection. In addition, engine-downsizing measures in combination with supercharging offer attractive engine-modification possibilities. For all engines, measures aimed at achieving short-term consumption reductions should be considered, beside e.g. electromechanical valve control and other measures evaluated in the study. Because of their high cost-effectiveness, solutions, like use of fuel-saving car tyres and low-friction oils, also have, despite their small specific emission reduction, non-negligible potential for climate gas reduction if introduced on a large scale. The use of methanol or dimethyl ether from natural gas in internal combustion engines likewise reduces overall emissions compared to today's petrol engines, when including emissions from fuel production and fuel use, and it does so without incremental costs, if vehicle production cost and non-tax fuel costs are considered. If it is of interest to introduce fuels from new energy sources in the traffic sector, these two fuels are the best alternatives from the cost-benefit perspective. Both can be technically adapted to existing petrol (methanol) or diesel engines (dimethyl ether) for monovalent use.

The production of engines run on compressed natural gas is a more complex and expensive solution. It achieves, in part, emission reductions at relatively low abatement costs. The model also shows that although the further tightening-up of current exhaust emission standards, e.g. to levels corresponding to California's SULEV or a future EURO 5 standard, causes an increase in cost, these variants are more favourable from the cost-benefit perspective than the same vehicles with current standards (EURO 4), if these are at first less favourable as a EURO 4-variant from the environmental perspective in comparison to the reference.

The application of the assessment results in scenario calculations shows that the implementation of the most cost-efficient measures – improved petrol and diesel engines, fuel-saving car tyres, low-friction oils, methanol and dimethyl ether – offers the potential to reduce total CO<sub>2</sub> emissions from passenger cars in Germany by approximately 30% by 2020 in comparison to the trend scenario. In terms of vehicle production costs and non-tax fuel costs, such a scenario involves no incremental costs compared to a continuation of the current trend.



<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>GEGENWÄRTIGER ERKENNTNISSTAND.....</b>	<b>3</b>
2.1	ZIELE UND BEWERTUNGSINSTRUMENTE EINER NACHHALTIGEN ENTWICKLUNG.....	4
2.1.1	<i>Allgemeingültige Zieldefinitionen.....</i>	<i>4</i>
2.1.2	<i>Allgemeingültige Bewertungsinstrumente .....</i>	<i>5</i>
2.2	UMWELTVERTRÄGLICHKEIT DES VERKEHRS .....	7
2.2.1	<i>Verkehrsbezogene Umwelthandlungsziele.....</i>	<i>7</i>
2.2.2	<i>Entwicklung der straßenverkehrsbezogenen Umweltbelastungen.....</i>	<i>10</i>
2.2.3	<i>Verkehrsbezogener Bewertungsvorschlag für die wichtigsten Umweltkategorien .....</i>	<i>15</i>
2.3	ABGRENZUNG ZU VORLIEGENDEN BEWERTUNGEN IM VERKEHR .....	16
2.3.1	<i>Vorliegende Umweltbewertungen.....</i>	<i>16</i>
2.3.2	<i>Vorliegende Umweltbewertungen unter Berücksichtigung von Kostenaspekten .....</i>	<i>19</i>
2.4	ANFORDERUNGEN AN EINEN UMWELTVERTRÄGLICHKEITS- UND KOSTENVERGLEICH .....	20
2.4.1	<i>Umweltverträglichkeitsvergleich.....</i>	<i>20</i>
2.4.2	<i>Kostenvergleich .....</i>	<i>21</i>
<b>3</b>	<b>METHODIK DER KOSTEN-NUTZEN-ANALYSE .....</b>	<b>27</b>
3.1	SYSTEMATISCHER AUFBAU EINER ÖKOBILANZ.....	27
3.1.1	<i>Ressourcenbeanspruchung.....</i>	<i>31</i>
3.1.2	<i>Treibhauseffekt .....</i>	<i>32</i>
3.1.3	<i>Stratosphärischer Ozonabbau.....</i>	<i>32</i>
3.1.4	<i>Direkte Humantoxizität (relative Toxizität).....</i>	<i>33</i>
3.1.5	<i>Kanzerogenität (relative kanzerogene Potenz).....</i>	<i>34</i>
3.1.6	<i>Photochemische Oxidantienbildung .....</i>	<i>35</i>
3.1.7	<i>Versauerungspotential.....</i>	<i>36</i>
3.1.8	<i>Eutrophierung.....</i>	<i>36</i>
3.1.9	<i>Naturraumbeanspruchung, Flächenverbrauch .....</i>	<i>36</i>
3.1.10	<i>Lärmbelastung .....</i>	<i>38</i>
3.1.11	<i>Ortsklassen .....</i>	<i>38</i>
3.2	DARSTELLUNG DES VERMEIDUNGSKOSTENANSATZES.....	40
3.2.1	<i>Berechnung der Vermeidungskosten.....</i>	<i>40</i>
3.2.2	<i>Bewertung der Vermeidungskosten und Wahl des Vermeidungskostenansatzes .....</i>	<i>41</i>
<b>4</b>	<b>MODELLENTWICKLUNG UND MODELLERGEBNISSE.....</b>	<b>45</b>
4.1	RANDBEDINGUNGEN DER MODELLENTWICKLUNG.....	45
4.1.1	<i>Fahrzeugkategorie und Referenz .....</i>	<i>45</i>
4.1.2	<i>Verwendete Treibstoffe.....</i>	<i>46</i>
4.1.3	<i>Antriebsvarianten .....</i>	<i>47</i>
4.1.4	<i>Verwendete Fahrzyklen .....</i>	<i>48</i>
4.2	MODELLBESCHREIBUNG .....	49

4.3	ERMITTLUNG UND VERKNÜPFUNG DER UMWELTBEZOGENEN MODELLEDATEN .....	52
4.3.1	<i>Umwandlungsketten der Treibstoffherstellung</i> .....	53
4.3.1.1	Erforderliche Prozesse.....	54
4.3.1.2	Referenzprozess.....	58
4.3.2	<i>Stoffspezifische Emissionen</i> .....	59
4.3.3	<i>Fahrzeugbetrieb</i> .....	61
4.3.3.1	Eigenschaften der Antriebe .....	61
4.3.3.2	Fahrzeugvergleiche.....	70
4.3.3.3	Verbrauchswerte von Pkw .....	74
4.3.3.4	Referenzfahrzeug.....	74
4.3.3.5	Limitierte Schadstoffe von Pkw.....	74
4.3.3.6	Nicht-Limitierte Schadstoffe von Pkw .....	81
4.3.3.7	Lärmemissionen von Pkw .....	82
4.3.3.8	Sonderausstattungsmerkmale .....	83
4.3.4	<i>Herstellung der Fahrzeugkonzepte und Antriebe</i> .....	84
4.3.4.1	Darstellung der wesentlichen Abgrenzungen .....	85
4.3.4.2	Gegenüberstellung der Sachbilanzergebnisse.....	88
4.3.5	<i>Zusammenfassung der Umweltwirkungen</i> .....	93
4.3.6	<i>Ergebnisse der Umweltwirkungen</i> .....	93
4.3.7	<i>Gesamtergebnisse der Umweltwirkungen</i> .....	121
4.4	ERMITTLUNG UND VERKNÜPFUNG DER KOSTENBEZOGENEN MODELLEDATEN.....	125
4.4.1	<i>Kosten der Treibstoffherstellung</i> .....	126
4.4.2	<i>Kosten der Herstellung der Antriebe und Fahrzeuge</i> .....	126
4.4.2.1	Antriebsvergleiche.....	126
4.4.2.2	Speichervergleich .....	127
4.4.2.3	Fahrzeugkarosserie .....	127
4.4.2.4	Abgasminderungssysteme .....	128
4.4.2.5	Zusammenfassung der Antriebs- und Speicherkosten.....	131
4.4.3	<i>Ergebnisse der Kostenbilanz</i> .....	133
4.5	MODELLERGEBNISSE DES KOSTEN-NUTZEN-VERGLEICHES .....	137
4.6	BEWERTUNGSVERFAHREN FÜR DIE MODELLERGEBNISSE.....	143
4.7	EINFLUSS DER KRAFTSTOFFKOSTEN UND DER WAHL DER REFERENZ .....	146
4.8	WEITERGEHENDE NUTZUNGEN DER MODELLERGEBNISSE .....	149
<b>5</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNG UND EMPFEHLUNG .....</b>	<b>153</b>
5.1	GEWINNER UND VERLIERER .....	153
5.2	ABSCHLIEßENDE EMPFEHLUNG .....	158
<b>6</b>	<b>VERZEICHNISSE UND BEGRIFFSBESTIMMUNGEN.....</b>	<b>163</b>
6.1	LITERATUR .....	163
6.2	VERWENDETE SYMBOLE.....	186
6.3	ABKÜRZUNGEN .....	187
6.4	BEGRIFFSBESTIMMUNGEN .....	190
<b>7</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>195</b>

### **Vorbemerkungen**

In dieser Arbeit wird der sprachlich übliche Begriff „Gewicht“ (z.B. Leergewicht, Karosseriegewicht) an Stelle des in der Physik üblichen Begriffs „Masse“ verwendet. An Stelle des in der Physik üblichen Begriffes des Energieträgers „Elektrizität“ wird auch der Begriff „Strom“ verwendet.



# 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die Umweltbelastungen durch den Verkehr werden durch eine regelmäßige Fortschreibung der Grenzwerte reduziert. Gleichzeitig weisen die Antriebe eine zunehmende spezifische Energieeffizienz auf. Andererseits nehmen die Umweltbelastungen durch einen Anstieg des absoluten Energieverbrauches und der Klimagasemissionen zu. Dies ist in der Zunahme der Fahrleistungen begründet. Auch in den Wirkungskategorien Lärmbelastung und Flächenverbrauch sind weiterhin zunehmende Belastungen zu verzeichnen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit – neben den grundlegenden Anforderungen der Nachhaltigkeit – zukünftig gezielt Technologien zu entwickeln und einzusetzen, die besonders auf die aus heutiger Sicht in Trendszenarien<sup>1</sup> nicht erreichbaren Umweltqualitätsziele ausgerichtet sind.

Darüber hinaus werden regelmäßig neue Energieträger und Antriebe für den Verkehr vorgestellt, diskutiert und von verschiedenen Seiten gefördert, obwohl diese gleichzeitig auch in Konkurrenz zueinander stehen. Dies gilt besonders dann, sofern neue Technologien wegen politischer oder wirtschaftlicher Anforderungen zeitgleich entwickelt werden müssen. Diese Konkurrenzsituation ist in der Regel in begrenzten finanziellen und personellen Ressourcen für die Entwicklung neuer Techniken und Technologien begründet. Eine möglichst objektive Prioritätensetzung auf der Basis von Daten ist daher sehr hilfreich, wenn nicht sogar notwendig.

Viele technische Neuentwicklungen im Verkehrssektor, die zu einer Minderung der Umweltbelastungen führen, haben ihren Ursprung in gesetzgeberischen oder politischen Forderungen und deren Willen zur Umsetzung (z. B. Abgasrichtlinien, CO<sub>2</sub>-Minderungsziele der Bundesregierung oder Selbstverpflichtungen der Automobilindustrie). Um auch vor dem Hintergrund geänderter Herausforderungen an den Umweltschutz, globaler Handlungsstrategien der Industrie und eines erhöhten Kostenbewusstseins der Fördergeldgeber und der Industrie den Zielen einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung im Verkehrssektor gerecht zu werden, ist ein Verfahren zur umweltbezogenen Bewertung neuer Technologien sinnvoll und hilfreich.

Es wird eine Methodik entwickelt und im Rahmen einer rechnergestützten Modellentwicklung angewendet, mit der eine **vergleichende Bestimmung der Umweltverträglichkeit verschiedener Antriebe und Energieträger im Straßenverkehr** (z.B. Ottomotor, Dieselmotor, Elektroantrieb, Brennstoffzelle) vorgenommen werden kann. Dabei werden Sach- und Wirkungsbilanzen nach den Maßregeln der Ökobilanzen auch für zukünftige Abgasstandards ermittelt (SULEV, EURO 5). Zum ersten Mal ermöglicht der Vergleich dadurch einheitliche emissionsbezogene Anforderungsprofile an zukünftige Pkw-Technologien. Darüber hinaus werden die Umweltbilanzen mit den für diese Arbeit detailliert modellierten Kostenbilanzen der neuen Antriebe verknüpft, um Bewertungen und Aussagen ableiten zu können, die deutlich über das Maß

---

<sup>1</sup> Szenario, das die Fortschreibung der heutigen Situation in die Zukunft (Trend-Extrapolation) beinhaltet. Weitere Begriffsbestimmungen finden sich in Kapitel 6.4. Abkürzungen finden sich in Kapitel 6.3

früherer ökologischer Bewertungen hinausgehen. Diese Kosten-Nutzen-Untersuchungen bilden einen weiteren Baustein der Nachhaltigkeit.

Die schnelle Weiterentwicklung konventioneller Motoren führt zu immer neuen Techniken, die im Zuge der konkreten Modellierung nicht alle berücksichtigt werden können. Das Ziel der Arbeit besteht daher auch darin, eine Methodik zu entwickeln und anzuwenden, deren Grundlagen auf andere zukünftige Techniken übertragbar sind.

Nach der folgenden allgemeinen Zusammenfassung des gegenwärtigen Kenntnisstandes hinsichtlich der Umweltziele und vorhandener Bewertungsinstrumente (Kapitel 2.1), werden diese Ergebnisse auf den Verkehrssektor bezogen (Kapitel 2.2). Dabei werden die Schwerpunkte der folgenden Bewertung begründet.

Im Anschluss daran wird der aktuelle Diskussionsstand aus vorliegenden Umweltbewertungen und Kosten-Nutzen-Analysen zusammengefasst (Kapitel 2.3-2.4), um die verwendete Methodik und Modellentwicklung gegenüber vorhandenen Arbeiten abzugrenzen.

Es folgt eine allgemeine Beschreibung des angewendeten Verfahrens der Untersuchungen nach den Vorgaben der Ökobilanz (Kapitel 3.1) und der Methodik zur Ermittlung der Vermeidungskosten (Kapitel 3.2). Nach der begründeten Fahrzeugwahl (Kapitel 4.1) wird das in dieser Arbeit entwickelte Bewertungsmodell beschrieben (Kapitel 4.2). Die Modelldaten für die Umweltwirkungen der Treibstoffherstellung, des Fahrzeugbetriebes und der Herstellung von Fahrzeug und Antrieben werden in Kapitel 4.3 erläutert und quantifiziert. In Kapitel 4.4 werden die notwendigen fahrzeug- und treibstoffbezogenen Kostengrößen dargestellt und für das Modell so zusammengefasst, dass in Kapitel 4.5 die Modellergebnisse des Kosten-Nutzen-Vergleiches dargestellt werden können.

Die Kosten werden anhand einer statischen Investitionsrechnung ermittelt, bei der die Herstellungskosten der Fahrzeuge und die steuerfreien Treibstoffkosten auf die Nutzungsdauer der Fahrzeuge bezogen werden. Die Kosten über die Nutzungsdauer werden ins Verhältnis zu dem umweltrelevanten Nutzen im gleichen Zeitraum gesetzt (Vermeidungskostenansatz).

Ein in Kapitel 4.6 dargestelltes erweitertes Bewertungsverfahren ermöglicht die Einordnung der Ergebnisse aus Kapitel 4.5 in wechselnden Wirkungskategorien und im relativen Vergleich durch eine Darstellung des Bewertungsranges zueinander. Zusätzlich erfolgt in Kapitel 4.7 eine Einordnung der Kraftstoffkosten (Benzin, Diesel) und der Referenz zum Gesamtergebnis. Ergänzende Anwendungsmöglichkeiten der Modelldaten werden in Kapitel 4.8 vorgeschlagen.

In den Schlussfolgerungen werden die aus gesamtheitlicher Sicht besten und ungünstigen Varianten der Modelluntersuchungen gegenübergestellt (Kapitel 5.1). Die abschließenden Empfehlungen in Kapitel 5.2 quantifizieren das damit verbundene CO<sub>2</sub>-Minderungspotential für einen Zeitraum von etwa 20 Jahren in Deutschland.

## 2 Gegenwärtiger Erkenntnisstand

In früheren Jahrzehnten waren die Anforderungen an die Umweltverträglichkeit von Verbrennungskraftmaschinen und von Kraftstoffen im Straßenverkehr teilweise von Einzelereignissen (z. B. Waldschäden, Eutrophierung von Gewässern) und aus den daraus resultierenden Erfordernissen der internationalen Angleichung von umweltpolitischen Entwicklungen im Vergleich zu Japan und den USA (Kalifornien) bestimmt [25]. Im ersten Umweltprogramm der Bundesregierung von 1971 [67] wurde deshalb auch schon dem Grundsatz der Vorsorge Rechnung getragen. Darauf aufbauend konnte die stufenweise Minderung der Abgasemissionen und die damit verbundene europaweite Grenzwertverschärfung eingeführt werden [26]. Auf Grundlage des 1987 vorgelegten Berichtes der Brundtland Kommission für Umwelt und Entwicklung [296] wurde erstmals der Begriff der „**nachhaltigen Entwicklung**“ eingeführt und definiert. Unter nachhaltiger Entwicklung versteht man demnach eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen.

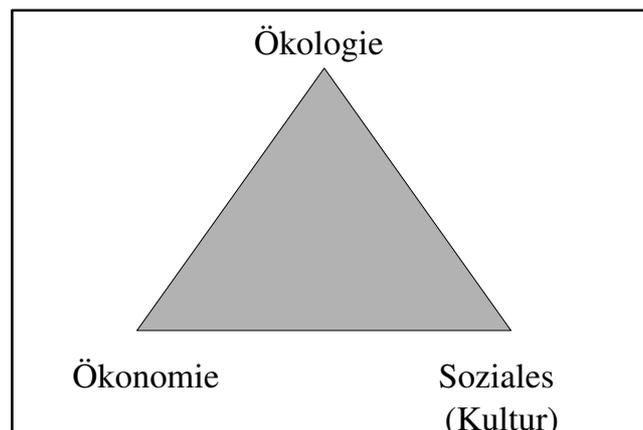


Abb. 2-1: Drei Dimensionen nachhaltiger Entwicklung

Diese integrative Politikstrategie ist damit nicht nur auf einzelne Produkte, sondern auf eine ganzheitliche Betrachtung der Lebensgrundlagen ausgerichtet. Gegenüber der bis zu jenem Zeitpunkt vorherrschenden Umweltpolitik betonte der Begriff nachhaltige Entwicklung

- einerseits die Beziehungen zwischen ökologischer, ökonomischer, sowie sozialer und kultureller Entwicklung (Abb. 2-1) und
- andererseits die vorrangige Orientierung am **Vorsorgeprinzip** sowie die großräumige Dimension von **Umweltzielen und Umweltstrategien**, die – national, regional und lokal – konkretisiert werden müssen ([240], [261]).

## 2.1 Ziele und Bewertungsinstrumente einer nachhaltigen Entwicklung

Zunächst werden in Kapitel 2.1 die allgemeinen, nicht aufgabenbezogenen Ziele und Bewertungsinstrumente der Nachhaltigkeit beschrieben. Die Ziele und Bewertungsinstrumente für den Verkehr werden in Kapitel 2.2 beschrieben.

Die Herausforderung der nachhaltigen, auch als dauerhaft umweltgerecht bezeichneten Entwicklung liegt für die Industrieländer darin, ihre ressourcenintensive und umweltbelastende Lebens- und Wirtschaftsweise mit den natürlichen Lebensgrundlagen dauerhaft in Einklang zu bringen. Eine Erhöhung des Ressourcenverbrauches in den Umweltmedien Luft, Boden und Wasser, sowie auch eine Erhöhung des Energieressourcenverbrauches ist nicht mit den Prinzipien einer nachhaltigen Entwicklung vereinbar. Die Industrieländer müssen daher Wege aufzeigen und konsequent beschreiten, die einen hohen Lebensstandard mit deutlich niedrigerem Ressourcenverbrauch ermöglichen [44]. Hierbei gelten folgende, allgemein definierten Handlungsgrundsätze, deren spezifische Quantifizierung zunächst problematisch erscheint:

- Erneuerbare Naturgüter dürfen auf Dauer nur innerhalb ihrer Regenerationsfähigkeit genutzt werden (z.B. energetische Nutzung von Biomasse nur im Umfang der natürlichen Nachwuchsrates), andernfalls gingen sie zukünftigen Generationen verloren (Regeneration),
- nicht-erneuerbare Naturgüter dürfen nur in dem Maße genutzt werden, wie ihre Funktionen durch andere Materialien oder durch andere Energieträger ersetzt werden können (Substitution) und
- die Freisetzung von Stoffen oder Energie darf auf Dauer nicht größer sein als die Anpassungsfähigkeit der Ökosysteme, z. B. Begrenzung der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Minimierung des weltweiten Temperaturanstieges (Anpassungsfähigkeit).

Die zuvor allgemein formulierten Grundsätze nachhaltiger Entwicklung werden in Kapitel 2.1.1 den allgemein formulierten Zieldefinitionen und den möglichen Bewertungsinstrumenten (Kapitel 2.1.2) gegenübergestellt.

### 2.1.1 Allgemeingültige Zieldefinitionen

Ausgehend von den gegenwärtigen Prognosen zu umweltbezogenen Entwicklungen ist eine Zieldefinition für umweltbezogene Anforderungen erforderlich, um dem langfristig angelegten Vorsorgeprinzip Rechnung zu tragen. Umweltrelevante Ziele sind die **Basis der Bewertung** neuer Technologien. Außerdem sind diese Umweltziele (Ökologie) nach dem Grundsatz der Nachhaltigkeit auch bezüglich ihrer sozialen (kulturellen) und ökonomischen Anforderungen abzuwägen (Abb. 2-1). Besonders schwierig erscheint zunächst die Identifikation und Bewertung sozialer Kriterien bei einer Untersuchung neuer Technologien, jedoch bietet folgende Differenzierung eine Lösungsmöglichkeit:

Für die Lösung der Umweltprobleme müssen auf Grundlage der Definition allgemeiner Prinzipien einer umweltgerechten Entwicklung konkrete **Umweltqualitätsziele** (UQZ) definiert werden. Das UQZ beschreibt den langfristig angestrebten Zustand der Umwelt.

**Umwelthandlungsziele** (UHZ) definieren unter Abwägung der drei Dimensionen nachhaltiger Entwicklung, also der umweltpolitischen, wirtschaftlichen und sozialen Ziele, die Schritte, in denen die Qualitätsziele erreicht werden sollen (Tab. 2-1). Fasst man die Ziele unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit zusammen, so zeigt sich, dass nicht nur umweltpolitische Maxime, sondern gleichfalls Sozialverträglichkeit und Kosteneffizienz als eine Charakterisierungsgröße ökonomischer Aspekte eine wesentliche Rolle bei der Definition der UHZ spielen.

Tab. 2-1: Definitionen für Umweltqualitätsziel und Umwelthandlungsziel [245]

Umweltqualitätsziel (UQZ)	Umwelthandlungsziel (UHZ)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Charakterisierung eines angestrebten Zustands der Umwelt in einer für die Umweltbeobachtung geeigneten Größe, z. B. als Konzentrationsangabe.</li> <li>• Das UQZ enthält sowohl naturwissenschaftliche als auch gesellschaftlich-ethische Elemente und verbindet einen naturwissenschaftlichen Kenntnisstand mit gesellschaftlichen Wertungen über Schutzgüter und Schutzniveaus.</li> <li>• Das UQZ wird objekt- oder medienbezogen für Mensch und/oder Umwelt bestimmt und ist an der Regenerationsrate wichtiger Ressourcen oder an der ökologischen Tragfähigkeit, am Schutz der menschlichen Gesundheit und an den Bedürfnissen heutiger und zukünftiger Generationen orientiert.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beschreibung der insgesamt erforderlichen Belastungsminderung als Differenz zwischen einer gegenwärtigen Belastung und einer höchstzulässigen Belastung (z. B. Emissionsmenge).</li> <li>• Maß für die insgesamt erforderliche Verringerung der Einwirkungen auf die Umwelt (z. B. Emission), um ein UQZ zu erreichen.</li> </ul>

Während die Grundsätze der Nachhaltigkeit und die Anforderungen der Umweltqualitäts- und Umwelthandlungsziele den Rahmen umweltpolitischer Handlungen vorgeben, bieten Bewertungsinstrumente die Möglichkeit, Aussagen darüber zu treffen, inwiefern neue Technologien und Techniken diese Ansprüche erfüllen können. Eine Zusammenfassung umweltbezogener Bewertungsinstrumente wird im folgenden Kapitel 2.1.2 gegeben.

### 2.1.2 Allgemeingültige Bewertungsinstrumente

Zu den wesentlichen umweltbezogenen Bewertungsinstrumenten gehören die Technikfolgenabschätzung (TA) und die Ökobilanz. TA beschreibt eine Summe unterschiedlicher Bewertungsverfahren. Ökobilanzen können als Bestandteil der TA durchgeführt werden. Bei der Ökobilanz handelt es sich um ein eigenständiges normiertes Bewertungsverfahren. Die wesentlichen Eigenschaften dieser Instrumente lassen sich wie folgt zusammenfassen.

### Technikfolgenabschätzung (TA)

Die Anstöße zur TA erfolgten in den 60er Jahren in den USA. Bereits im Jahr 1973 brachte die damalige Oppositionsfraktion im deutschen Bundestag einen Gesetzentwurf zur Errichtung eines „Amtes zur Bewertung technologischer Entwicklungen“ ein, auf dessen Grundlage ein Gutachten zur Institutionalisierung von Technikfolgenabschätzung erstellt wurde [194]. In Deutschland wurde 1990 das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag eingerichtet, mit dem Ziel, Beiträge zur Verbesserung der Informationsgrundlagen forschungs- und technologiebezogener Entscheidungsprozesse im Deutschen Bundestag zu leisten.

TA kann bei der Einführung oder Veränderung einer Technologie eingesetzt werden. Sie definiert sich als eine integrierte und systematische Schätzung und Voraussage der wesentlichen **sozialen, umweltrelevanten** und **wirtschaftlichen** Auswirkungen in einer Gesellschaft. TA umfasst Produkte genauso wie technische und soziale Verfahren auf privater und staatlicher Ebene. Ziel von TA ist die Erfassung, Messung und Bewertung von Technologie-Auswirkungen, die unbeabsichtigt, indirekt und/oder mit großem Zeitverzug auftreten. TA soll vor allem vor der Einführung einer neuen Technologie erfolgen; sie soll dafür sorgen, dass

- zu möglichst allen Auswirkungen ausreichende Informationen zur Verfügung stehen,
- auch die unerwünschten und unbeabsichtigten Nebeneffekte (sekundäre negative Effekte) erfasst werden,
- durch gezielte Forschung und Entwicklung negative Effekte vermieden oder zumindest reduziert werden und
- bei gleichwertigen Alternativen hinsichtlich der Primäreffekte, also die mit der Technologie unmittelbar angestrebten Effekte, diejenigen mit den geringsten negativen oder größten positiven sekundären Effekten gewählt werden.

Zusammenfassend geht es bei TA-Untersuchungen um das vorausschauende Abwägen von **Chancen und Risiken** und um die **Gestaltung neuer technischer Entwicklungen** und ihrer **Rahmendingungen** [226].

### Produktbezogene Ökobilanz

Das Konzept der Ökobilanz (Englisch = Life Cycle Assessment, LCA) ist in den letzten Jahren als Instrument sowohl des Umweltschutzes wie auch der Produktoptimierung entwickelt worden. Um die möglichen oder tatsächlichen Auswirkungen eines Produktes auf die Umwelt – oft im Vergleich zu einem anderen, konkurrierenden Produkt – systematisch zu erfassen, wird dessen ganzer Lebensweg unter **ökologischen Gesichtspunkten** analysiert. Darüber hinaus soll durch die produktbezogene Ökobilanz die Möglichkeit eröffnet werden, Schwachstellen des Produktes oder des Produktionsprozesses aufzudecken, die Produktion zu modernisieren, Ressourcen zu sparen und Herstellungskosten zu senken. Der normierte Aufbau einer Ökobilanz wird in Kapitel 3.1 beschrieben.

### Technikfolgenabschätzung (TA) und produktbezogene Ökobilanz im Vergleich

Ausgehend von der Tatsache, dass sich die von Produkten ausgehenden Umweltbelastungen nur dann hinreichend genau ermitteln lassen, falls der gesamte Lebenszyklus des Produktes betrachtet wird, bietet die Ökobilanz – im Gegensatz zur Technikfolgenabschätzung – konkrete Untersuchungs- und Bewertungsverfahren an. Dazu gehört zum einen eine medienübergreifende Betrachtung unter Berücksichtigung der maßgeblichen Eingangs- (Energie, Materialien, Wasser) und Ausgangsströme (Luft, Abwasser, Abfall, Lärm). Zum anderen ist eine systemübergreifende Lebensweg-Analyse des Produktes (von der Wiege bis zur Bahre, cradle to grave) mit allen produktrelevanten Aspekten von der Herstellung über den Transport, den Verbrauch und Gebrauch bis hin zur Entsorgung durchzuführen. Das Ziel der Ökobilanz ist eine umweltrelevante Beurteilung des Produktes. Anders als die TA verfolgt das Konzept der Ökobilanz nicht alle Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung (Abb. 2-1), weil sie nur aus Sicht des Umweltschutzes, ohne Abwägung ökonomischer und sozialer Auswirkungen erstellt wird. Die Ökobilanz-Ergebnisse sollen deshalb mit ökonomischen und – sofern möglich – mit sozialen Faktoren zusammengefügt werden. Durch eine Kombination der normierten, systematischen Vorgehensweise der Ökobilanz unter Berücksichtigung von umweltpolitischen, wirtschaftlichen und sozialen Zielen, sowie den eher allgemein formulierten Anforderungen der TA soll in dieser Arbeit ein Beitrag geleistet werden, technische Produkte hinsichtlich ihrer Beiträge für eine nachhaltige Entwicklung gegenüberzustellen und anhand von Modellberechnungen zu untersuchen. Hierfür ist es notwendig, im folgenden Kapitel 2.2 die hier benannten allgemeinen Grundsätze auf die konkreten Gegebenheiten des Verkehrs zu übertragen.

## **2.2 Umweltverträglichkeit des Verkehrs**

Die Beurteilung des Verkehrs hinsichtlich seiner Umweltwirkungen erfordert zunächst die Konkretisierung der bisher allgemein definierten UQZ und UHZ (Tab. 2-2a-b) für den Verkehrssektor. Eine Gegenüberstellung der Ziele (Kapitel 2.2.1) mit den gegenwärtigen und absehbaren Entwicklungen (Kapitel 2.2.2) soll die Identifikation der wichtigen Umweltkategorien ermöglichen. Dabei handelt es sich um die Kategorien, in denen die UQZ aller Voraussicht nach nicht erreicht werden und über ein Trendszenario hinausgehende Maßnahmen erforderlich sein werden. Die so ermittelten bedeutsamen Umweltkategorien sind in Kapitel 2.2.3 zusammengefasst und dienen später als ein wesentlicher Maßstab der umweltrelevanten Bewertung von alternativen Antrieben und Treibstoffen.

### **2.2.1 Verkehrsbezogene Umwelthandlungsziele**

Politisch wurden bereits eine Reihe von UHZ festgelegt, die sich zum Teil explizit auf den Verkehr beziehen oder zum Teil alle Sektoren umfassen, aber für den Verkehr als einen Verursacher besondere Bedeutung haben. In einem Maßnahmenplan Umwelt und Verkehr [241] des Umweltbundesamtes (UBA) wurden Vorschläge für Umwelthandlungsziele zusammengefasst und abgeleitet. Es wird deutlich, dass nicht jedes der folgenden UHZ allein durch technische Maßnahmen im Verkehr erreicht werden kann. Dennoch ist es erforderlich, dass alle relevanten

UHZ dargestellt werden, auch um die Grenzen von technischen Maßnahmen für verkehrsbezogene UHZ zu verdeutlichen (Tab. 2-2a-b).

Tab. 2-2a: Verkehrsbezogene Umwelthandlungsziele ([241], [245])

Schutzgut	Umwelthandlungsziel	Zeitraum		Fachlicher Bezug
		von	bis	
Klima: CO <sub>2</sub>	Reduktion der CO <sub>2</sub> -Emission in Deutschland um 25%	1990	2005	Klimaschutzprogramm der Bundesregierung 2000 [50], Bundesumweltministerium [47]
	Reduktion um 15-20 Mio. t CO <sub>2</sub>	1998	2005	
	Reduktion der CO <sub>2</sub> -Emissionen in den Industrieländern • um rund 40% • um rund 80% unter Berücksichtigung eines CO <sub>2</sub> -Anstieges in Entwicklungsländern.	1990 1990	2020 2050	Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des 12. Deutschen Bundestages, 1994
	Senkung der durchschnittlichen CO <sub>2</sub> -Emissionen von Neufahrzeugen auf 120 g/km		2010	
Gesundheit: kanzerogene Schadstoffe	Reduktion der Benzol-, PAH- und Dieselruß-Emissionen • um rund 90% (Krebsrisiko: 1:2.500) • um rund 99% (Krebsrisiko: 1:5.000) • Dieselruß-, Benzolreduktion um 90%, 96%	1988 1988 1990	2005 2020 2020	LAI „Krebsrisiko durch Luftverunreinigung“, 1992; [157]; SRU „Gutachten 1994“; [200] Bundesumweltministerium [47]
Gesundheit: Sommer- smog, Wald, Boden, Ge- wässer	Reduktion der NO <sub>x</sub> - und flüchtige HC-Emissionen • um 40% (Ozonalarm) • um 80% • um 75% (NO <sub>x</sub> ) und 88% (flüchtige HC)	sofort 1987 1990	2005 2010	BImSchG, § 40 SRU „Umweltgutachten 1994“ Bundesumweltministerium [47]
Gesundheit: Lärmschutz	1. Abbau von Belastungen auf ≤65 dB(A) tags („Schutz der Gesundheit“) 2. Reduktion der Belastung auf ≤59 dB(A) tags / ≤49 dB(A) nachts (Wohngebiete) 3. Reduktion der Belastung auf ≤55 dB(A) tags / ≤45 dB(A) nachts (Wohngebiete)	sofort	2005  2010 2030	Umweltbundesamt  UBA; 16. BImSchV; SRU „Umweltgutachten 1994“; [200] Empfohlenes Schutzniveau der WHO
Ressourcen- schonung (stofflich)	a) Langlebigkeit von Automobilen und ihren Teilen b) Vorrang stofflicher vor energetischer Verwertung; • Verwertungsquote 85% mind. 15% Wiederverwendung • Verwertungsquote 95% • Verwertungsquoten 85% Recycling 80% • Verwertungsquoten 95% Recycling 85%	sofort	sofort  2002 2015 2006 2015	Altautoverordnung [43]  Vorschlag für eine Richtlinie des Rates über Altfahrzeuge [150]

Tab. 2-2b: Verkehrsbezogene Umwelthandlungsziele ([241], [245])

Schutzgut	Umwelthandlungsziel	Zeitraum		Fachlicher Bezug
		von	bis	
Ressourcenschonung (energetisch)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Die Dienstleistung, die hinter einer Energieanwendung steht, muss effizienter werden (rationelle Energieverwendung).</li> <li>2. Der stetig wachsende Bedarf an Energiedienstleistungen in den industrialisierten Ländern muss gemindert werden. Das derzeitige Wachstum der Ansprüche ist ökologisch, ökonomisch und sozial auf Dauer nicht durchhaltbar.</li> <li>3. Die konventionellen Energieträger müssen durch erneuerbare Energieträger abgelöst werden.</li> <li>4. Nicht-erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen (3.) oder höherer Produktivität (2.) der erneuerbaren sowie der nicht-erneuerbaren Ressourcen geschaffen wird.</li> </ol>			<p>Strategien einer zukünftigen Energieversorgung – kein UHZ; Bundesumweltministerium [45]</p> <p>Managementregel für Energiestoffströme in einer nachhaltigen Entwicklung [70]</p>
Natur und Landschaft	a) Reduktion zusätzlicher Flächeninanspruchnahme um 75% auf 30 ha/Tag.	sofort	2010	Bundesumweltministerium [47]
	b) Umsetzung des UMK-Handlungskonzepts "Naturschutz und Verkehr", z.B. Erhalt unzerschnittener verkehrsarmer Räume, Erhalt und Entwicklung von Naturvorrangflächen.	sofort		Umweltministerkonferenz, 1992
	c) Kein weiterer Neu- und Ausbau von Straßen, kein Neubau von Schienenwegen und Wasserstraßen in wertvollen Landschaftsräumen.	sofort		Umweltbundesamt
	d) Mit nächstem Bundesverkehrswegeplan keine Erweiterung des Fernstraßennetzes (Beschränkung auf Ausbau; Neubau nur in Ausnahmefällen bei Rückbau an anderer Stelle).	sofort		Umweltbundesamt
	e) Übernahme des Prinzips "Ausgleich von Neubau durch Rückbau" in die Verkehrsentwicklungs- und Raumordnungspläne.	sofort		Umweltbundesamt
Wohnumfeldverbesserung / Stadtverträglichkeit	a) Minderung des Lebenszeitrisikos, durch einen Verkehrsunfall innerorts als Fußgänger oder Radfahrer getötet (auf 1 : 2.500) oder schwer verletzt (auf 1 : 125) zu werden		2005	Umweltbundesamt
	b) Wartezeiten für querende Fußgänger sollen an Strecken 30 sek. und an Knoten 40 sek. nicht überschreiten		2005	Apel, D.; 1994; [19]
	c) Fahrbahn plus Parkstreifen dürfen nicht mehr als 50% der Straßenbreite einnehmen; Gehwegbreite: 3,80 m Radwegbreite: 2,50 m		2020	"Berliner Ansatz", Senat für Stadtentwicklung und Umweltschutz, 1993; [217]

Vor einer weiteren Einordnung der genannten UHZ werden im folgenden Kapitel 2.2.2 die Entwicklung der Umweltbelastungen aus dem Verkehr den o.g. UHZ gegenübergestellt. Der Schwerpunkt der Darstellung wird auf die Kategorien beschränkt sein, die maßgeblich durch technische Maßnahmen am Kraftfahrzeug zu beeinflussen sind, da diese Arbeit darauf ausgerichtet ist.

## 2.2.2 Entwicklung der straßenverkehrsbezogenen Umweltbelastungen

In Emissionsszenarien bis zum Jahr 2020 für die Bundesrepublik Deutschland wird deutlich, dass zukünftig die limitierten Emissionen des Straßenverkehrs trotz eines erwarteten Anstieges der Fahrleistungen weiter zurückgehen.

Die folgenden Untersuchungen sind Ergebnisse des sog. TREMOD (Transport Emission Estimation Model) Trendszenarios ([123], [127]). TREMOD ist das bisher vom Umweltbundesamt, den Bundesministerien, dem Verband der Deutschen Automobilindustrie, dem Mineralölwirtschaftsverband sowie der Deutschen Bahn AG genutzte Expertenmodell zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland. Die Gesamtschau der Fahrleistungen und der Abgasemissionen kommt zu folgendem Ergebnis (Abb. 2-2):

Die **Fahrleistungen** aller Kfz nehmen bis 2020 im Vergleich zum Bezugsjahr 2003 um 24% zu. Bei Pkw handelt es sich um 25%, bei leichten Nutzfahrzeugen liegt die Zunahme bei 21%, bei schweren Nutzfahrzeugen bei 17% und bei motorisierten Zweirädern bei 39%. Insbesondere der Fahrleistungsanteil der Pkw in Höhe von 83% an den gesamten Fahrleistungen im Jahr 2020 beeinflusst das Ergebnis deutlich. Ferner wird die Erfüllung aller gültigen und zukünftigen Grenzwertanforderungen und die Einführung verbesserter Kraftstoffe vorausgesetzt. Bei Neufahrzeugen wird darüber hinaus eine frühzeitigere Erfüllung der Grenzwerte unterstellt, die z.B. durch eine steuerliche Förderung ermöglicht wird.

Der Rückgang der **limitierten Schadstoffemissionen** wird durch die weitere Substitution von Altfahrzeugen mit emissionsgünstigeren Neufahrzeugen erreicht, die zudem noch weiter verschärften Grenzwerten genügen. Die hohen Grenzwertanforderungen von EURO 4 an die Pkw und von EURO 4/5 an die Nutzfahrzeuge wirken sich auf die Gesamtemission besonders günstig aus. Da der Erfolg einer Minderung nur daraus bestimmt werden kann, ob damit Luftqualitäts- oder andere Umweltziele erreicht werden, muss sichergestellt werden, dass in zukünftigen Emissionsszenarien, unabhängig vom Fahrzeugantrieb, die UQZ erreicht werden. Unter diesem Blickwinkel werden erst die überwiegend aus dem Verkehr stammenden Emissionen, wie Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide und die Summe der Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe als Ozonvorläufersubstanzen, kanzerogene Substanzen, sowie die klimarelevanten Emissionen dargestellt.

Die verkehrsbedingten **Stickstoffoxidemissionen** in Deutschland liegen nach den Trendszenarien der Bundesrepublik Deutschland ab 2013 um 75% niedriger als 1987, eine weitere signifikante Reduktion ist in den Folgejahren jedoch nicht mehr zu erwarten. Somit ist eine Unterschreitung der Empfehlungswerte der World Health Organization (WHO, Jahresmittelwert:  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) an verkehrsreichen Straßen zwar wahrscheinlich, aber nicht sicher. Dieser Grenzwert wird nach der 22. BImSchV (Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft) vom 11.09.2002 in Deutschland ebenfalls ab dem Jahr 2010 als Immissionsgrenzwert zum Schutz der menschlichen Gesundheit gelten. Auf Grundlage heutiger Prognosen ergeben sich Unsicherheiten, weil zukünftig ein überproportionaler Anteil der Fahrleistung von Otto-Pkw (EURO 4) durch Diesel-Pkw (EURO 4) mit deutlich höheren Stickstoffoxidemissionen ersetzt wird (Abb. 7-1, Anhang) oder falls die Fahrleistungen stärker steigen werden als angenommen

[125]. Daher ist es wahrscheinlich, dass der EURO 4 Grenzwert für Diesel-Pkw nochmals auf einen treibstoffneutralen EURO 5 Standard reduziert werden wird, der weitgehend den EURO 4 Grenzwerten für Benzin-Pkw entspricht.

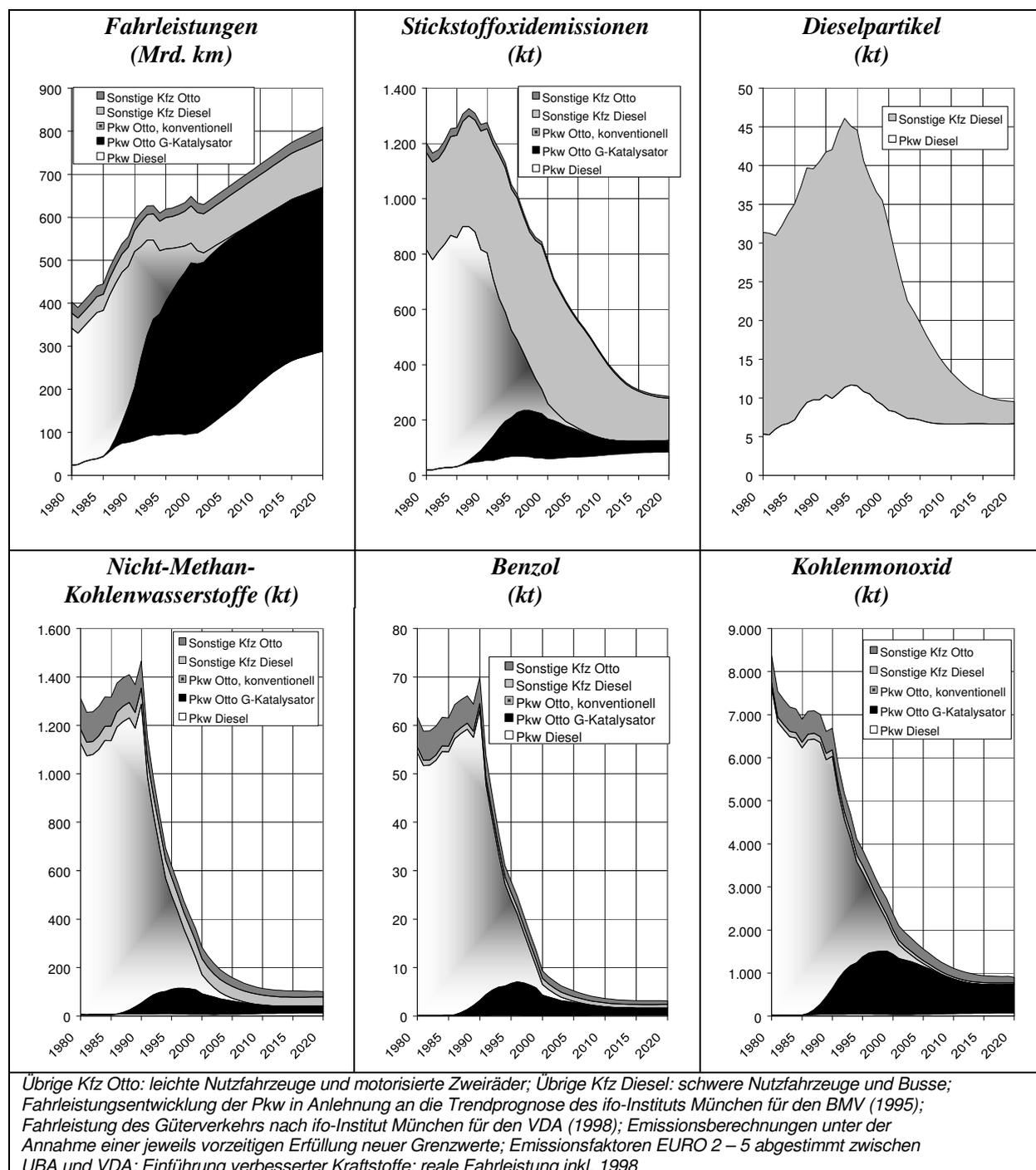


Abb. 2-2: Entwicklung der Fahrleistungen und der Emissionen im deutschen Straßenverkehr 1980 – 2020 auf der Basis der TREMOD Trendszenarien ([123], [125], [127])

Die **Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe** wurden bereits bis 2000 um 80% reduziert (Basisjahr 1987), bis zum Jahr 2020 erreicht die Reduktionsrate sogar 93%. Damit werden die Reduktionsziele für NMHC-Emissionen unterschritten. Die Konzentrationen des Sekundärschadstoffes **Ozon (O<sub>3</sub>)** hängen maßgeblich vom NO<sub>2</sub>/NO-Konzentrationsverhältnis und von der wirksamen

Lichtintensität ab. Durch die Mitwirkung der Kohlenwasserstoffe und deren Radikale wird das  $\text{NO}_2/\text{NO}$ -Verhältnis vergrößert, was bei starker Sonneneinstrahlung zur Erhöhung der Ozonkonzentration führt. Die  $\text{NO}_2$ -Photolyse ist also der „Motor“ der Ozonbildung, und flüchtige organische Verbindungen sind der „Treibstoff“, der dafür sorgt, dass NO immer wieder schnell zu  $\text{NO}_2$  umgewandelt wird [253]. Da NO zu großen Teilen durch den Verkehr emittiert wird, kommt es im Sommer regelmäßig – vornehmlich in großen Städten – zu der Situation, dass die Ozonbelastung an besonders verkehrsreichen Straßen niedriger ist als am Stadtrand und in den angrenzenden ländlichen Gebieten. An verkehrsreichen Straßen übersteigt der Ozonabbau die Ozonbildung. In den letzten zehn Jahren ist in Deutschland ein abnehmender Trend bei den beobachteten Ozonspitzenkonzentrationen erkennbar (Abb. 7-2, Anhang). Bei der Darstellung ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass sich über die Jahre die Verteilungen der Standorte der Messstellen geändert haben. Während Anfang der 90er Jahre die Messstellen noch grob flächendeckend verteilt waren, hat sich seither die Zahl der Messstellen an verkehrsreichen Straßen zunehmend erhöht. Trotz Zunahme von Verkehrsmessstationen ist also eine Minderung der Ozonspitzenkonzentrationen zu erkennen.

Um Gesundheitsgefahren zukünftig ausschließen zu können, ist eine Verringerung der Emissionen der Vorläufersubstanzen ( $\text{NO}_x$ , NMHC) um 70 bis 80% – bezogen auf die Emissionen Mitte der 80er Jahre – erforderlich. Die Stickstoffoxidemissionen des Straßenverkehrs liegen nach dem TREMOD Trendszenario ab 2015 etwa 75% niedriger als 1987 (Maximum), die NMHC-Emissionen werden ab 1998/2000 um 70 bis 80% niedriger als 1990, dem Jahr der maximalen Gesamtemission, liegen. Demnach müssten die Luftqualitätsziele des Sachverständigen Rates für Umweltfragen (SRU), des UBA und der WHO zur Minderung der Ozonkonzentrationen, zur Reduktion der Bodenversauerung und zur Minderung der Stickstoffeinträge in Nord- und Ostsee (Eutrophierung) als erfüllt gelten [125].

Unter den von Kraftfahrzeugen emittierten Substanzen mit einem **kanzerogen Risiko** sind die Rußpartikel und deren elementarer Kohlenstoffgehalt (EC-Gehalt der Partikel), Benzol und Benzo(a)pyren die wichtigsten. In Ballungsräumen und im ländlichen Raum, abseits von Hauptverkehrsstraßen, werden bis zum Jahr 2020 die Zielwerte des Länderausschusses für Emissionenschutz (LAI), des Umweltbundesamtes (UBA) und des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU) eingehalten. Praktisch bedeutet dies, dass das Individualrisiko im Hinblick auf die Begrenzung des Lebenszeitriskos durch Inhalation kanzerogener Substanzen langfristig auf  $1:5.000^2$  reduziert wird. Das Risiko durch andere Belastungspfade (z. B. Ernährung) wird dabei nicht berücksichtigt. Dieser Zielwert soll für Ballungsräume gelten; er orientiert sich an dem heutigen Luftqualitätsniveau des ländlichen Raums [125]. Auch in Hauptverkehrsstraßen werden die langfristigen Zielwerte von UBA und SRU bei Benzol und Benzo(a)pyren im Jahr 2020 erreicht (Abb. 7-3, Anhang). Bei den Rußpartikeln kann das Qualitätsziel (Reduktion des Lebenszeitriskos auf 1:5000) in hochbelasteten Straßen eingehalten werden, sofern die Fahr-

---

<sup>2</sup> Dies entspricht einem Lebenszeitrisiko von 200 Krebsfällen je Millionen Einwohner und Lebenszeit. Das auf Grundlage der Unit-Risk-Faktoren und Immissionskonzentrationen abgeschätzte Lebenszeitrisiko durch Ruß, Benzol und Benzo(a)pyren liegt heute im Nahbereich der Straßen bei etwa 950 Krebsfällen je Millionen Einwohner und Lebenszeit (1:1.000) und im städtischen Raum bei etwa 400 Krebsfälle je Millionen Einwohner und Lebenszeit (1:2.500) [249].

leistungen der Diesel-Pkw entgegen dem Trendszenario nicht signifikant zunehmen. Dies erscheint zur Zeit jedoch nicht der Fall zu sein. Mit Sicherheit kann das Qualitätsziel jedoch immer eingehalten werden, sofern Diesel-Pkw mit Partikelfiltern ausgerüstet werden. Sollten die Fahrleistungen der Diesel-Pkw ohne Partikelfilter jedoch deutlicher ansteigen, wie im TREMOD Trendszenario vorgesehen (Anteil der Fahrleistung von Diesel-Pkw an den Pkw-Gesamtfahrleistungen im Jahr 2020 bei 43%), kann davon ausgegangen werden, dass die Luftqualitätsziele für kanzerogene Substanzen nicht erreicht werden.

**Kohlenmonoxid**-Immissionen erreichen in Deutschland selbst an den höchstbelasteten Straßen schon seit langem nicht mehr bedenkliche Konzentrationen. Eine weitergehende Bewertung dieser Luftschadstoffe ist daher nicht mehr erforderlich.

Für die **klimawirksamen CO<sub>2</sub>-Emissionen** ergeben sich im Vergleich zu den Entwicklungen der Abgasemissionen ungünstigere Trendentwicklungen. Zur Beurteilung der Umweltqualitätsziele dient das TREMOD Trendszenario (Abb. 7-4, Anhang). Es berücksichtigt den Anstieg der Fahrleistung und fahrzeugspezifische CO<sub>2</sub>-Minderungen bei den Neufahrzeugen, die sich an der Selbstverpflichtung der Automobilindustrie mit der Europäischen Union (durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Emission der neu verkauften Fahrzeuge im Jahr 2008/2009 von 140 g/km) orientiert. Das Ergebnis zeigt eine Zunahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland um 10% bis 2020 gegenüber 1990. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Pkw sinken um 14%, während die CO<sub>2</sub>-Emissionen der übrigen Kfz um 70% im Trendszenario zunehmen. Umweltqualitätsziele für die Kategorie Klimaschutz können damit im Straßenverkehr nicht erreicht werden.

Für die Kategorie des **Ressourcenschutzes** wurden keine verbindlichen Ziele definiert (vgl. Tab. 2-2), da aus Gründen des Klimaschutzes ein größerer Handlungsbedarf besteht. Diese Schwerpunktsetzung ist damit zu erklären, dass weniger die Erschöpfung der nicht-erneuerbaren Energiequellen das Hauptproblem ist, sondern die Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre für CO<sub>2</sub> als Verbrennungsprodukt nicht-erneuerbarer Kohlenstoffverbindungen ([240], [261]). Der Vergleich der TREMOD Trendszenarien im Anhang in Abb. 7-4 und Abb. 7-5 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kraftstoffverbrauch. Dies gilt, sofern alle Kraftstoffe ausschließlich auf Erdöl basieren und die Verhältnisse zwischen Otto- und Dieselmotoren verhältnismäßig konstant bleiben. Daher zielen Klimaschutzmaßnahmen häufig auch direkt auf die Einsparung nicht-erneuerbarer Ressourcen oder auf die Verwendung kohlenstoffarmer Energieträger. Obwohl für die Schonung der Energieressourcen keine Handlungsziele festgelegt wurden, sondern allenfalls Handlungsstrategien empfohlen werden, soll in dieser Arbeit auch der Energieressourcenverbrauch bewertet werden.

Die Schätzung des Ausmaßes der **Belastung durch Verkehrsgeräusche** wird vom Umweltbundesamt gegenwärtig nur für die alten Bundesländer vorgenommen. Die Eingangsgrößen für die Modellrechnungen zeigen keine wesentlichen Veränderungen gegenüber früheren Jahren (Abb. 7-6, Anhang). Minderungseffekte, die durch technische Maßnahmen an den Fahrzeugen möglich sind, werden z.B. beim Straßenverkehr durch gestiegene Fahrleistungen wieder ausgeglichen. Der Straßenverkehr ist während des Tages die dominierende Geräuschquelle. Etwa 15,6% der Bevölkerung der alten Bundesländer sind im Mittel am Tag mit Pegeln über 65 dB(A), knapp die Hälfte der Bevölkerung mit Geräuschpegeln über 55 dB(A) belastet [254].

Auch nachts ist die Geräuschbelastung durch Straßenverkehr hoch; 31% der Bevölkerung sind mit Mittelungspegeln über 50 dB(A) betroffen.

Langfristig sehen die Planungsrichtlinien der DIN 18005 vor, die Lärmbelastungen für allgemeine Wohngebiete am Tag auf 55 dB(A) und nachts auf 40-45 dB(A) zu reduzieren. In reinen Wohngebieten soll die Lärmbelastung sogar auf 50 dB(A) tagsüber und 35-40 dB(A) nachts reduziert werden. Für einen vorbeugenden Gesundheitsschutz wird als Schwellenwert für den Anstieg des Risikos derzeit ein Immissionspegel von tagsüber 65 dB(A) außerhalb der Wohnungen angesehen. Das heißt, im Jahr 2005 sollten keine Lärmbelastungen der Bevölkerung über 65 dB(A) am Tage vorliegen (Tab. 2-2a). Ohne weitergehende Maßnahmen ist bis zum Jahr 2005 jedoch nicht zu erwarten, dass dieses Ziel erreicht wird. Auch nach diesem Zeitpunkt sind keine Änderungen zu erwarten, die diesem Ziel gerecht werden können. Der Bevölkerungsanteil, der mit Pegeln über 65 dB(A) belastet sein wird, wird nach Berechnungen des Umweltbundesamtes im Jahr 2005 lediglich auf 14,6% sinken (Abb. 7-6, Anhang). Diese geringe Minderung ist besonders auf den Einfluss der Steigerung der Fahrleistungen (Abb. 2-2) zurückzuführen. Die zu erwartenden durchschnittlichen Minderungen der Emissionspegel von Pkw und Lkw im realen Innerortsverkehr von 1 bis 2 dB(A) werden dadurch kompensiert.

Die Siedlungs- und **Verkehrsfläche** umfasste 1997 11,8% der Gesamtfläche Deutschlands, davon ist mindestens die Hälfte überbaut oder versiegelt. Rund 40% der Fläche entfallen auf die Verkehrsfläche, unter der man die für den Straßen-, Luft-, Schienen- und Schiffsverkehr genutzten Flächen versteht (Abb. 7-7, Anhang). Die gegenwärtig zunehmende Flächeninanspruchnahme von circa 120 ha/Tag allein durch Siedlung und Verkehr ist weit von dem in Leitlinien des Bundesumweltministeriums genannten Ziel von 30 ha/Tag [47] entfernt. Der Umweltrat weist aber darauf hin, dass selbst ein bis 2020 auf 30 ha verringerter täglicher Flächenverbrauch noch zu einer überbauten und versiegelten Fläche in Deutschland führen würde, die in deutlichem Widerspruch zu zentralen Zielen eines nachhaltigen Boden-, Natur-, Klima- und Artenschutzes stünde. Dies gilt um so mehr, als auch andere Formen der Flächeninanspruchnahme in wachsendem Umfang in Konkurrenz zu den Flächennutzungen durch Siedlung- und Verkehr treten (z. B. Flächennutzungen durch den Abbau oberflächennaher Rohstoffe, Windenergie, Freizeit- und Erholungsnutzungen, Wasserwirtschaft, sowie Land- und Forstwirtschaft) [201].

Da mit flächenbezogenen Umweltzielen besonders die permanente **räumliche Entwicklung** gesteuert und überprüft werden soll, müssen zur Beurteilung des Zustandes, der Qualität oder des Zielerreichungsgrades einer eingetretenen Raumentwicklung oder zur Einschätzung der zu erwartenden Raumentwicklung Kriterien herangezogen werden, die nicht nur rückblickend und Teilaspekte betrachtend Aufschluss über geeignete Veränderungen geben (z.B. Rote Liste), sondern gesamthaft und möglichst vorausschauend einen Überblick über den Zustand ermöglichen [265]. Als möglichen methodischen Ansatz empfiehlt der Umweltrat hierzu eine flächendeckende Ermittlung und Bewertung struktureller Veränderungen der Landschaft [200].

### 2.2.3 Verkehrsbezogener Bewertungsvorschlag für die wichtigsten Umweltkategorien

Aus der Gegenüberstellung der Umwelthandlungsziele im Verkehr (Kapitel 2.2.1) mit den absehbaren Entwicklungen im Straßenverkehr (Kapitel 2.2.2) lassen sich nun die Handlungsfelder herausarbeiten, in denen vorrangig über die Trendszenarien hinausgehende Minderungen der Umweltbelastungen erforderlich sein werden.

Zunächst ist der durch die CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachte Treibhauseffekt eine der maßgeblich zu mindernden Größen. Es empfiehlt sich, die Notwendigkeit der CO<sub>2</sub>-Minderung sogar noch höher zu bewerten, als die Minderung des Energieressourcenverbrauches. Auch die Emissionen kanzerogener Substanzen müssen wegen ihrer Wirkung deutlich reduziert werden. Ein weiteres Handlungsfeld ist die Kategorie der Lärmemissionen des Straßenverkehrs, in dem auch zukünftig keine signifikanten Minderungen zu erwarten sind. Gleiches gilt für den Flächenverbrauch, der sich in Trendszenarien nicht stabilisieren, sondern vielmehr zunehmen wird. Dessen Bewertung ist besonders dann von Interesse, sofern unterschiedliche Verkehrsträger und deren Flächenbedarf verglichen werden. In dieser Arbeit wird daher auch der Flächenverbrauch der untersuchten Fahrzeuge ermittelt. Da jedoch alle Fahrzeuge dem gleichen Verkehrsträger (Pkw) und der identischen Kategorie (Kleinwagenklasse) entsprechen, führt die Änderung des Antriebes nicht zu einer Änderung des Flächenverbrauches, so dass eine anschließende vergleichende Bewertung in dieser Kategorie entfällt.

Allein die durch Stickstoffoxid- und/oder Kohlenwasserstoffemissionen verursachten Versauerungen, Überdüngungen und sekundär entstehende Ozonkonzentrationen (photochemische Oxidantien) sind aus heutiger Sicht eher als unkritisch einzuschätzen, da durch die absehbaren Entwicklungen die genannten Umwelthandlungsziele eingehalten werden.

Aufbauend auf diesen grundsätzlichen Erwägungen können nun für die spätere Bewertung der neuen Antriebe Vorschläge abgeleitet werden, die die unterschiedlichen umweltrelevanten Wirkungen bewerten. Je weniger die Chance besteht, dass in den Trendszenarien ein Umweltziel erreicht wird, desto wichtiger ist der zukünftige Handlungsbedarf durch den Einsatz neuer Antriebe zu bewerten und desto höher soll die relative Gewichtung dieser Wirkungskategorie sein.

Es werden zunächst zwei Bewertungsszenarien empfohlen (Tab. 2-3), die sich dadurch auszeichnen, dass die auf Grund der Belastungssituation wichtigen Wirkungskategorien (Treibhauseffekt, humantoxische und kanzerogene Wirkung) jeweils überproportional bewertet werden. Durch diese Schwerpunktsetzung werden zwei Grenzen gesetzt, in deren Rahmen sich alle grundsätzlichen Aussagen hinsichtlich der Umweltrelevanz und des daraus abzuleitenden Handlungsbedarfes bewegen werden, ohne die Gesamtschau aller Wirkungskategorien zu vernachlässigen. Das Schwerpunktszenario, das die Treibhauswirkung neuer Antriebe überproportional bewertet, wird als CO<sub>2</sub>-Szenario bezeichnet. Das Szenario, das den Schwerpunkt auf die zu mindernden humantoxischen und kanzerogenen Emissionen setzt, wird als Humantoxizitätsszenario bezeichnet. Unberücksichtigt bleiben die Kategorien aquatische Eutrophierung und Flächenbeanspruchung, da der Schwerpunkt der Bewertung auf der terrestrischen Eutrophierung liegt und die zu untersuchenden neuen Antriebe und Treibstoffe in Pkw nicht zu einer Änderung

der Flächenbeanspruchung führen. Somit bleibt auch die landwirtschaftliche Flächennutzung durch den Anbau biogener Rohstoffe für Treibstoffe unberücksichtigt.

Ähnliche Bewertungen wurden bereits durch das Institut für Energie und Umweltforschung, Heidelberg, in verschiedenen Arbeiten erfolgreich angewendet ([122], [129], [190]). Eine weitergehende Erläuterung zu den genannten Wirkungskategorien findet sich darüber hinaus in den Abschnitten zu Kapitel 3.1.

Tab. 2-3: Bewertungsvorschläge für eine Gewichtung von Wirkungskategorien

Wirkungskategorie	Gewichtung nach Nutzen	
	CO <sub>2</sub> -Szenario	Humantoxizitätsszenario
1. Ressourcenbeanspruchung	10%	10%
2. Treibhauseffekt	45%	15%
3. Stratosphärischer Ozonabbau	5%	5%
4. Direkte Humantoxizität	5%	15%
4.1. Kanzerogenität	10%	30%
5. Direkte Ökotoxizität	k.A.	k.A.
6. Photochemische Oxidantienbildung	5%	5%
7. Versauerung	5%	5%
8. Eutrophierung		
8.1. Aquatische Eutrophierung	<sup>1)</sup>	<sup>1)</sup>
8.2. Terrestrische Eutrophierung	5%	5%
9. Naturraumbeanspruchung (Flächen)	<sup>2)</sup>	<sup>2)</sup>
10. Lärm	10%	10%

<sup>1)</sup> Die Kategorie aquatische Eutrophierung wurde hier nicht berücksichtigt. Der Schwerpunkt der Bewertung liegt auf der terrestrischen Eutrophierung.

<sup>2)</sup> Die Kategorie Flächenverbrauch wurde hier nicht berücksichtigt. Die zu untersuchenden neuen Antriebe und Treibstoffe in Pkw führen nicht zu einer Änderung des Flächenverbrauches.

## 2.3 Abgrenzung zu vorliegenden Bewertungen im Verkehr

Nachdem im vorherigen Kapitel zunächst die notwendigen Schwerpunkte der Bewertung erarbeitet wurden, soll in diesem Kapitel die Abgrenzung dieser Arbeit zu bereits vorliegenden Bewertungen vorgenommen werden, bevor dann wieder auf die Anforderungen und weiteren Voraussetzungen des Umweltverträglichkeits- und Kostenvergleiches eingegangen (Kapitel 2.4) wird.

### 2.3.1 Vorliegende Umweltbewertungen

Zu den ersten zusammenfassenden Arbeiten bezüglich umweltrelevanter, gesamtheitlicher Bewertungen von Kraftfahrzeugen auch unter Berücksichtigung der Treibstoffherstellung gehörten Arbeiten des Studienprogramms für die Enquête Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 11. Deutschen Bundestages ([112], [287]), die Ende der 80er Jahre veröffentlicht wurden. Weitere Veröffentlichungen griffen diese Methodik auf, bei der Bewertung von Kraftfahrzeugen die Energieketten, Wirkungsgrade und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Treibstoffherstellung zu berücksichtigen ([72], [93], [142], [149], [197]). Auch in dem 1989 im Auftrag der Bundesregie-

nung erstellten „Fortschreibungsbericht über die Förderung des Einsatzes von Elektrofahrzeugen“ wurden bereits Ergebnisse von Untersuchungen zur Treibstoffherstellung berücksichtigt ([68], [48], [69]). Da sich die Sachbilanzergebnisse der am Fortschreibungsbericht beteiligten Institutionen jedoch teilweise unterschieden, wurden die Untersuchungen des Umweltbundesamtes [234] und eines Energieversorgungsunternehmens [220] gegenübergestellt. Mit der Einführung der weithin anerkannten GEMIS-Datenbank (Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme, [181], [182]) konnten dann erstmals die vorgelagerten Produktionsprozesse auf einer gemeinsamen, weitgehend abgestimmten Datenbasis bilanziert werden.

Die meisten Arbeiten im Verkehr haben sich bisher meist auf die verbrauchs- und schadstoffbezogenen Umweltvergleiche konzentriert, da die Nutzungsphase die Gesamtbilanz maßgeblich beeinflusst. Bisher liegen für den Sektor Straßenverkehr folgende wesentlichen Arbeiten vor.

- Für den Einsatz von **Rapsöl und Rapsölmethylester (RME)** als Ersatz von Dieselmotorkraftstoff wurde durch das UBA eine erste Ökobilanz bereits 1993 vor den Verfahrensregeln der DIN ISO 14040 [79] mit der sog. „Ökobilanz Rapsöl“ erstellt ([115], [235]). In der Zwischenzeit wurden weiterführende und auch kritische Veröffentlichungen zur Ökobilanz von Rapsöl und RME erarbeitet (z. B. [152], [209], [231]). Ende 1999 wurde durch das UBA eine Aktualisierung der Ressourcen- und Emissionsbilanz [121] sowie einer ergänzenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchung ([250], darin [205]) veröffentlicht, die eine erweiterte Bewertungsgrundlage zu den Ergebnisse aus dem Jahr 1993 darstellt.
- Die Bewertungen zu **Elektrostraßenfahrzeugen (ESF)** wurden hinsichtlich ihrer Energie- und Emissionsbilanz zwischen 1989 und 1996 kontrovers und umfassend diskutiert ([28], [30], [68], [106], [153], [220], [234], [236], [289]). Befürworter gründeten ihre Argumente auf der unbestrittenen lokalen Emissionsfreiheit, während Kritiker auf die ungünstige CO<sub>2</sub>-Bilanz des deutschen Kraftwerkparks und auf hohe Fahrzeugkosten verwiesen. Mit dem Abschlußbericht eines Forschungsprojektes des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung (BMBF) mit einer begleitenden Ökobilanz zu einem Elektrofahrzeugtest auf der Insel Rügen wurde die kontroverse Diskussion zunächst im Grundsatz abgeschlossen ([63], [117], [132]).
- Zur **Brennstoffzellentechnologie im Verkehr** wurden seit Mitte der 90er Jahre von der Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH [162] im Auftrag des BMBF, durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. ([75], [74], [75]), durch das Umweltbundesamt ([244], [252]), durch die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. [95], durch das Forschungszentrum Jülich ([96], [113]), durch die Internationale Energie Agentur ([97], [114]) und durch das Institut für Energie und Umweltforschung (ifeu), Heidelberg, im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung (TAB) [122] vergleichende Sachbilanzen unter Berücksichtigung der Treibstoffherstellung erstellt. Die wesentlichen Unterschiede in den Ergebnissen ergaben sich durch die Definition der Randbedingungen für die verglichenen Fahrzeugkonzepte (Gewicht, Verbrauch, technischer Stand). In der Arbeit des UBA [244] wurde erstmals auch eine Bewertung der Kosten-Nutzen-Effizienz auf Grundlage von Zielkosten und im Vergleich zu einem heutigen Fahrzeug erstellt. In der Studie des ifeu [122] wurden die Sachbilanzdaten auf Grundlage der methodischen Ansätze der Ökobilanzierung in Wir-

kungsbilanzen übertragen und so im Vergleich zu allen anderen Studien deutlich erweitert. In [126] wird ein Überblick über verfügbare Ökobilanzen von Brennstoffzellen-Antrieben in Pkw gegeben. Veröffentlichungen aus den Vereinigten Staaten legten den Schwerpunkt zunächst auf den direkten Verbrauch und die Fahrzeugmodellierung und weniger auf die Bilanzierung vorgelagerter Prozesse (z.B. [168], [22]).

- Mit einer fortschreitenden Minderung des Kraftstoffverbrauches von Kraftfahrzeugen erlangt auch die **Emissionsbilanz des Pkw** bezogen auf die Gesamtbilanz einen erhöhten Stellenwert. Verschiedene Arbeiten zur Gesamtbilanz von Pkw haben bereits Beiträge für umfassende Bewertungen geleistet (z. B. [134], [135], [168], [215], [273], [277], [280]). Darüber hinaus wurden in [193] Bilanzdaten für Brennstoffzellenantriebe ermittelt. Die veröffentlichten Sachbilanzdaten für die Herstellungsbilanzen von Bauteilen und Bauteilgruppen werden auch in dieser Arbeit verwendet.
- Der direkte Energieeinsatz auf dem Lebensweg der Bilanzierungsobjekte als auch der indirekt bei energieintensiven Materialien und Produkten auftretende Energieeinsatz ist in allen Ökobilanzen bedeutsam. Dieser wird als **kumulierter Energieaufwand (KEA)** bezeichnet und ist in VDI-Richtlinie 4600 ([268], [269]) definiert. Die Daten des kumulierten Energieaufwandes werden auch in dieser Arbeit in der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung quantifiziert, um die Prioritäten von Energiesparpotentialen in ihrem komplexen Zusammenhang zwischen Konstruktion, Herstellung und Nutzung von Kraftfahrzeugen aufzuzeigen (z.B. [184], [208], [246], [298]).
- In der **kalifornischen Abgasgesetzgebung** war ab dem Jahr 2003 die Einführung eines Null-emissionsfahrzeug-Standards (ZEV, Zero Emission Vehicle) vorgesehen. Zur Zeit ist die ZEV-Gesetzgebung ausgesetzt. Eine Verschiebung der ZEV-Einführung auf das Jahr 2005 wurde am 9.1.2004 vom California Air Resources Board (CARB) gegenüber dem California's Office of Administrative Law vorgeschlagen. Der Hersteller soll auch für Fahrzeuge mit besonders niedrigen Abgasemissionen einen sog. ZEV-Teilkredit erhalten. Diese Fahrzeuge werden dann als „teilweise ZEV“ (partial ZEV) und „fortgeschrittene Technik, teilweise ZEV“ (advanced technology partial ZEV) bezeichnet. Weltweit einmalig ist dabei, dass der Hersteller diesen nur dann erhalten kann, falls die Fahrzeuge auch besonders niedrige Emissionen bei der Treibstoffherstellung, -verteilung und -verdunstung (Fuel-Cycle Emission) aufweisen. Zur Berechnung der Emissionen der Energieketten wurden im Auftrag der kalifornische Umweltbehörde verschiedene Studien erstellt ([13], [14], [15]), auf deren Grundlage die Emissionen der Treibstoffbereitstellung durch den Automobilhersteller zu berechnen sind.

### 2.3.2 Vorliegende Umweltbewertungen unter Berücksichtigung von Kostenaspekten

In den bisher vorliegenden Umweltbewertungen neuer Technologien im Straßenverkehr sind Kostenaspekte nur selten berücksichtigt worden. Meist liegt der Schwerpunkt der Arbeiten auf einer Umweltbewertung.

Eine über die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hinausgehende Zusammenfassung von Wirtschaftlichkeits- und Umweltaspekten (Kosten-Nutzenaspekten) findet man in der Literatur selten (in [121], [205], [250] für RME; [244] für Brennstoffzellen; [21], [270], [283] für die Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie). Eine beispielhafte Darstellung von Ergebnissen aus Kosten-Nutzen-Analysen findet sich in [Abb. 2-3](#).

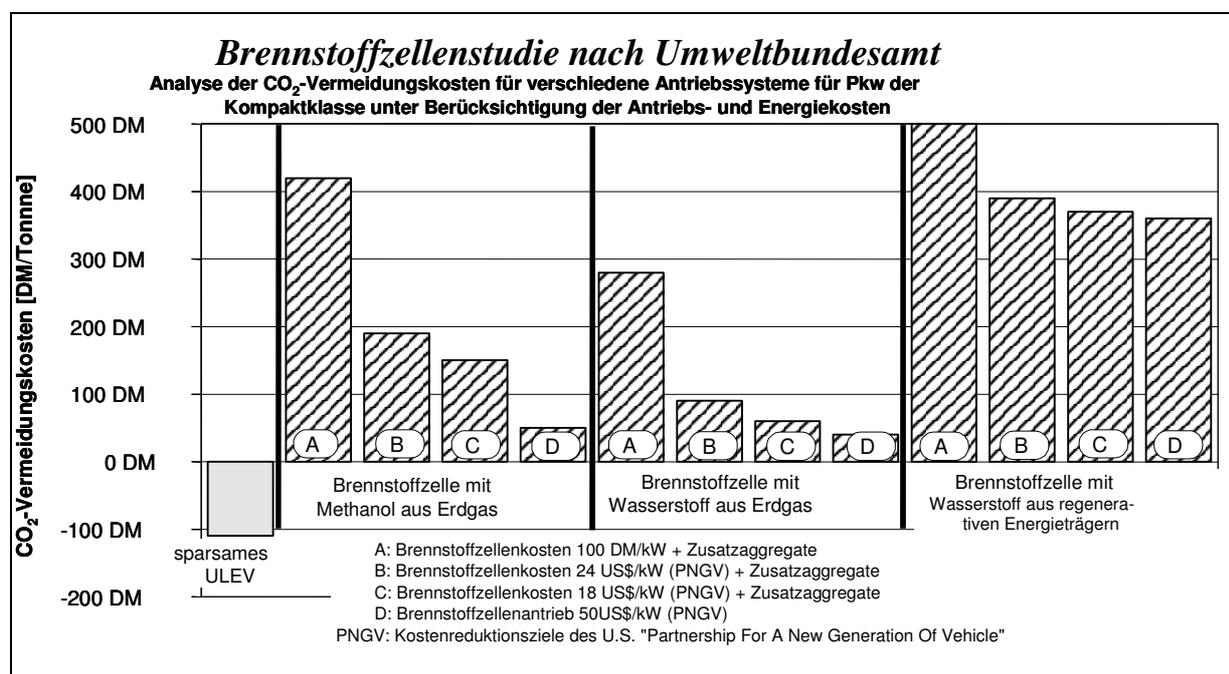


Abb. 2-3: Kosten-Nutzen-Rechnungen für Brennstoffzellenfahrzeuge [244]

Die Kostenrechnungen mit einem Bezug zu Umwelteigenschaften neuer Antriebsvarianten der Initiative der Verkehrswirtschaftlichen Energiestrategie sind in [Abb. 2-4](#) dargestellt. Die Fahrzeugkosten wurden hier jedoch nur als Zielkostenfaktoren gegenüber dem Otto-Referenz-Pkw (Wert = 1) quantifiziert.

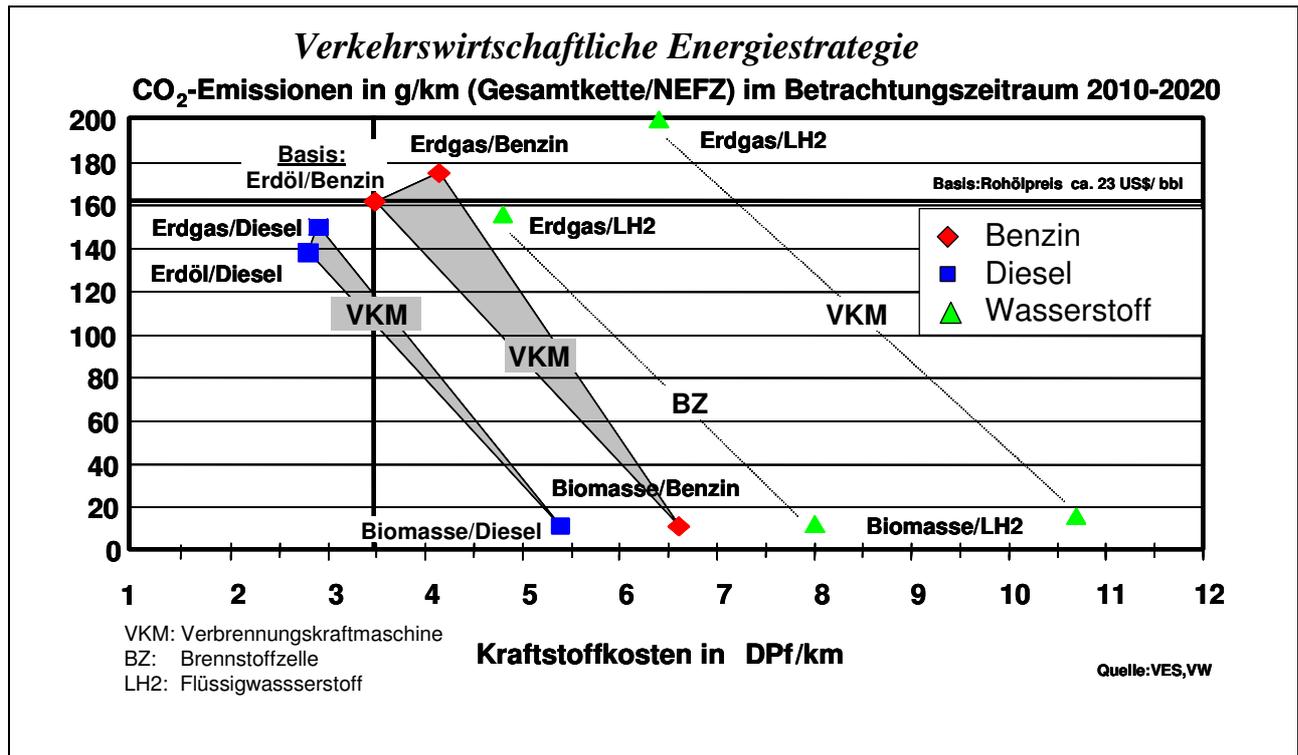


Abb. 2-4: Kosten-Nutzen-Rechnungen für alternative Treibstoffe der Verkehrswirtschaftlichen Energiestrategie [283]

## 2.4 Anforderungen an einen Umweltverträglichkeits- und Kostenvergleich

Nach der Darstellung des gegenwärtigen Sachstandes, der vorhandenen und absehbaren Belastungen im Straßenverkehr, der notwendigen umweltrelevanten Ziele in diesem Sektor, der Chronologie und der Inhalte der vorliegenden Arbeiten, sollen nun die prinzipiellen Voraussetzungen eines Umweltverträglichkeitsvergleiches (Kapitel 2.4.1) und Kostenvergleiches (Kapitel 2.4.2) für technische Maßnahmen im Straßenverkehr dargestellt werden. Dabei soll ein Bezug zwischen beiden Aspekten hergestellt werden.

### 2.4.1 Umweltverträglichkeitsvergleich

Die Umweltverträglichkeit von Kraftfahrzeugen wird in der Regel in unterschiedlicher Weise und auf verschiedenen Ebenen bewertet:

1. Prinzipiell soll die Umweltverträglichkeit von Kraftfahrzeugen dadurch sichergestellt sein, dass alle Neufahrzeuge den aktuellen gesetzlichen Anforderungen entsprechen. Eine besondere Aussagekraft haben diesbezüglich die **EG-Abgasgrenzwerte** für Kraftfahrzeuge. Der Kraftstoffverbrauch von Kraftfahrzeugen ist in Europa nicht limitiert. Dennoch ist jeder Hersteller verpflichtet die **Verbrauchswerte von Pkw** gemäß Richtlinie 80/1268/EWG i.d.F. 1999/100/EG [9] zu veröffentlichen.

2. Antriebe, die neue Treibstoffe verwenden, werden sehr häufig im Zuge von **Prozesskettenanalysen** unter Berücksichtigung der **Herstellung der Treibstoffe und deren Nutzung** bewertet. In diese Arbeit werden solche Bilanzen für die Prozessketten der Treibstoffe erstellt.
3. Neben der Sachbilanz für die Herstellung und Nutzung von Treibstoffen wird eine Bilanz für die **Herstellung der Kraftfahrzeuge** in die Bewertung einbezogen.
4. Um die Sachbilanz auf vorhandene Umweltproblemfelder zu beziehen, sollen alle **relevanten Umweltkategorien** (Wirkungskategorien) bewertet werden. Eine umfassende Liste möglicher Wirkungskategorien findet sich in folgender Tab. 2-4.

Die Ermittlung der Sachbilanzergebnisse und deren Bewertung basiert auf Grundlagen der Ökobilanz. Die Methodik der Ökobilanz wird im Detail in Kapitel 3.1 beschrieben. Die wesentlichen aus Tab. 2-4 zur Untersuchung stehenden Wirkungskategorien werden im Detail in den Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.10 beschrieben.

Tab. 2-4: Wirkungskategorien und deren Ortsbezug

lokale Betrachtungsebene	regionale Betrachtungsebene	globale Betrachtungsebene
- Lärmbelästigung	- Lärmbelästigung	- Treibhauseffekt
- Sommersmog (Photochemische Oxidantien)	- Sommersmog (Photochemische Oxidantien)	- Stratosphärischer Ozonabbau
- Versauerung (Böden, Gewässer)	- Versauerung (Böden, Gewässer)	- Ressourcenverbrauch (Energieträger, Rohstoffe)
- Eutrophierung (Böden, Gewässer)	- Eutrophierung (Böden, Gewässer)	- Naturraumbeanspruchung
- Humantoxizität (Atmung/Nahrung)	- Ökotoxizität (terrestrisch, aquatisch)	- Flächenzerschneidung
- Ökotoxizität (terrestrisch, aquatisch)	- Ressourcenbeanspruchung (Wasser)	- Entzug natürlichen Lebensraumes
- Geruchsbelästigung	- Naturraumbeanspruchung	
- Visuelle Störwirkungen	- Flächenzerschneidung	
- Flächenaufheizung (versiegelte Gebiete)		
- Naturraumbeanspruchung		
- Vorhandene Risiken wie Brandgefahr, Grundwassergefährdung etc.		

## 2.4.2 Kostenvergleich

Die jeweiligen in eine Berechnung einfließenden Kosten (Tab. 2-5) können zu unterschiedlichen Aussagen und Ergebnissen führen [183].

- Das **volkswirtschaftliche Kostenkonzept** ermöglicht Aussagen zu der anzustrebenden Struktur des technischen Systems aus gesamtwirtschaftlicher Sicht und soll dazu beitragen, dass die Belastung der gesamten Volkswirtschaft gesenkt werden kann. Das Kostenkonzept berücksichtigt auch die Gesamtheit der externen Kosten.
- Mit dem **betriebswirtschaftlichen Konzept** werden anhand einfacher Rentabilitätsrechnungen Vermeidungskosten berechnet, um die Vorteilhaftigkeit eines Projektes zu ermitteln. Durch die betriebswirtschaftliche Rentabilität, ausgedrückt als durchschnittlicher Periodengewinn in Prozent des durchschnittlichen Kapitaleinsatzes, können auch Kosten dargestellt

werden, die z.B. durch Subventionen ausgeglichen werden müssen, falls bestimmte Emissionsminderungen erzielt werden sollen.

- Der **Haushaltsansatz** berücksichtigt aus Sicht des Staates, an welcher Stelle die eingesetzten Haushaltsmittel am effizientesten verwendet werden. Es werden nur die Kosten und Erträge ermittelt, die für die öffentliche Hand von Interesse sind.

Tab. 2-5: Gegenüberstellung von Verfahren zur Ermittlung umweltrelevanter Kostenaspekte

<b>Volkswirtschaftlicher Kostenansatz<sup>1)</sup></b>	<b>Betriebswirtschaftlicher Kostenansatz</b>	<b>Haushaltsansatz</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• energie- und technikgebundene Kosten ohne Gewinne, Subvention, Steuern</li> <li>• Importpreise für Produkte</li> <li>• Kapitalkosten unter Berücksichtigung eines annuitätisch bestimmten volkswirtschaftlichen Realzinssatz</li> <li>• zusätzliche Berücksichtigung der Gesamtheit aller externen Kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investitionsrechnung durch Ermittlung der betriebswirtschaftlichen Rentabilität (Einnahmen, Kosten, Kreditzinsen, Eigenkapitalzinsen, Tilgung, Restkapital)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berücksichtigung der staatlichen Haushaltsmittel unterteilt nach Einnahmen (Steuern, Abgaben) und Ausgaben (Projektkosten, Subventionen)</li> </ul>

<sup>1)</sup> Einige Arbeiten schließen die externen Kosten im volkswirtschaftlichen Ansatz aus (z.B. [183]).

Das volkswirtschaftliche Kostenkonzept kann eine Bewertung neuer Technologien für die anzustrebenden Einsatzfelder und deren Struktur aus gesamtwirtschaftlicher Sicht geben, während die betriebswirtschaftliche Betrachtung zeigen kann, welche Probleme sich bei den Produzenten oder Anwendern dieser Technologien unter Berücksichtigung der Rentabilität ergeben. Sinnvoll erscheint es, dass erst nach einer positiven gesamtwirtschaftlichen Bewertung die betriebswirtschaftlichen Programmkosten ermittelt werden, um weitere Umsetzungshemmnisse zu identifizieren. Für die Berechnung der Vermeidungskosten im Zuge der Bewertung zukünftiger Technologien müssen alle Parameter, die das Ergebnis beeinflussen können, offengelegt werden (Tab. 2-6).

Tab. 2-6: Einflussfaktoren und Kostenpositionen für die Ermittlung der Kosten neuer Technologien

<b>Kosten neuer Technologien</b>	
<b>Einflussparameter</b>	<b>Parameter der Kostenanalyse<sup>1)</sup></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• unterschiedliche Lebensdauer der Technologien</li> <li>• Definition des bewerteten Entwicklungsstandes und der absehbaren Entwicklungspotentiale</li> <li>• Definition einer Referenzvariante mit vergleichbarem Entwicklungsstand</li> <li>• Definition des bewerteten Entwicklungsstandes für die Verfahren zur Herstellung der Energieträger</li> <li>• Berücksichtigung unterschiedlicher Herstellungsverfahren für die verwendeten Energieträger</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Herstellungskosten</li> <li>• (Investitionskosten)</li> <li>• Brennstoffkosten</li> <li>• sonstige Betriebskosten</li> </ul>

<sup>1)</sup> Alle Kostenangaben werden ohne Abgaben und Steuern angegeben.

Um unterschiedliche neue Technologien zu vergleichen, werden in der Regel Investitionsrechnungen durchgeführt. Für die Beurteilung der verschiedenen Investitionsprojekte unter Berücksichtigung

sichtigung des zeitlichen Faktors ist eine Unterteilung in eine **dynamische Investitionsrechnung** und in eine **statische Investitionsrechnung** möglich [295]. In Tab. 2-7 erfolgt zunächst eine allgemeine Gegenüberstellung der Verfahren der Investitionsrechnung, um anschließend die Berechnungsgrundlagen vorzustellen.

Tab. 2-7: Vergleich dynamischer und statischer Methoden der Investitionsrechnung

Verfahren	Investitionsrechnung	
	dynamisch Beurteilungsgröße	statisch
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Kapitalwert- oder Barwertmethode</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Barwert aller zukünftigen Ein- und Auszahlungen wird der Anfangszahlung gegenübergestellt</li> <li>• In Zukunft anfallende Zahlungen werden mit dem Kalkulationszinssatz diskontiert und so vergleichbar, als würde das eingesetzte Kapital anderweitig angelegt</li> <li>• Kapitalwert ist der über die Amortisation und Verzinsung des eingesetzten Kapitals hinaus erwirtschaftete Betrag (Ziel <math>\geq</math> Null)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Kostenvergleichsrechnung</b></li> <li>• <b>Gewinnvergleichsrechnung</b></li> <li>• <b>Rentabilitätsberechnung</b></li> <li>• <b>Amortisationsberechnung</b></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Interne Zinsflussmethode<sup>1)</sup></b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kalkulationszinsfluss, für den der Kapitalwert einer gegebenen Einzahlungs-/Auszahlungsreihe gleich Null wird</li> <li>• Interner Zinsfluss reflektiert die Verzinsung des gebundenen Kapitals. Das Investitionsprojekt ist vorteilhaft, sofern dieser Wert eine Mindestverzinsung übersteigt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berücksichtigung der Kosten der ersten Periode (Kapitalkosten, Betriebskosten)</li> <li>• Ermittlung des durchschnittlichen Gewinns pro Periode</li> <li>• Rentabilität (durchschnittlicher Periodengewinn in Prozent des durchschnittlichen Kapitaleinsatzes)</li> <li>• Rentabilität <math>&gt;</math> Mindestzins</li> <li>• Zeit, nach der das Kapital wieder zurückgewonnen werden kann (Amortisationszeit)</li> <li>• Verhältnis aus Kapitaleinsatz und durchschnittlichem Rückfluss pro Periode</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Annuitätenmethode</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produkt aus Kapitalwert und Annuitätenfaktor</li> <li>• Annuität <math>\geq</math> Null; Maß für den durchschnittlichen Periodenüberschuss</li> </ul>	

<sup>1)</sup> keine praktikable Berechnungsgrundlage; Gleichungen n-ten Grades (n = Nutzungsdauer)

Die statischen Modelle beziehen sich auf eine einzige Periode. Dies kann die erste oder die durchschnittliche Investitions- und Nutzungsperiode sein. Die dynamischen Methoden unterziehen die Investition einer Gesamtbetrachtung. Berücksichtigt werden die Ein- und Auszahlungen in allen zukünftigen Perioden bis zum Ende der Nutzungsdauer.

### Dynamische Investitionsrechnung

Um die zeitlichen Entwicklungen adäquat abbilden zu können, wird bei der Beurteilung größerer Investitionen vor allem die Barwertmethode verwendet [183]. Dabei werden alle zukünftigen Zahlungsflüsse mit einem einheitlichen Kalkulationszinssatz auf einen bestimmten Gegenwartswert abdiskontiert, um die Zahlungen miteinander vergleichbar zu machen. Da für die hier untersuchte Fragestellung stets eine bestimmte Option mit einer Referenzvariante verglichen wird, kann die Analyse zunächst auf die Auszahlungen begrenzt werden. Die Einnahmen entsprechen den vermiedenen Auszahlungen in der Basisvariante.

Der **dynamische ermittelte Barwert** (BW) einer Maßnahme errechnet sich danach wie folgt.

$$BW_{\text{einschl. Koppelprodukte}} = \sum_{i=0}^u \frac{AI_i + ABS_i + AS_i - EK_i}{(1+z)^i} \quad (2.1)$$

$AI_i$	Auszahlungen für Investitionen/Herstellungskosten im Jahre i
$ABS_i$	Auszahlungen für Brennstoffkosten im Jahre i
$AS_i$	Auszahlungen für sonstige Betriebskosten im Jahre i
$EK_i$	Erlöse aus der Abgabe von in der Referenzvariante nicht berücksichtigten Koppelprodukten im Jahre i
$z$	Kalkulationszinssatz
$u$	Untersuchungszeitraum

Die Größe  $EK_i$  wird nur dann berücksichtigt, falls bei der Bereitstellung eines Produktes Koppelprodukte entstehen, für die Erlöse anfallen. Als Beispiel sei die Untersuchung der Strombereitstellung genannt, bei der in der Kraft-Wärme-Kopplung Wärme anfällt, für die gesondert Erlöse anfallen.

Gleichzeitig sei jedoch angemerkt, dass die Monetarisierung von „Zukunftsinvestitionen“ durch Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung von einigen Experten kritisiert wird. Dies gilt besonders für die sog. Abdiskontierung von Zukunftsinvestitionen, also die Rückrechnung von Zukunftsinvestitionen auf Gegenwartskosten. Im Ergebnis würden nicht nur zukünftige Umweltschäden durch die Abdiskontierung mit ihrem Gegenwartswert relativ niedriger bewertet, sondern grundsätzlich werden alle zukünftigen Investitionen immer relativ geringer bewertet werden, als gegenwärtige Investitionen. In diesem Zusammenhang wird auch von der „Entwertung von Zukunftswerten“ gesprochen, da die Barwertmethode sich immer auf einen „zurückgerechneten“ Gegenwartswert bezieht ([160], [161], [291]). Um die Kritik aufzunehmen, könnten auch die Umweltwirkungen (z.B. Emissionen) über die Zeit auf einen Gegenwartswert mit einem Zinssatz „abgewertet“ werden. Zur Umsetzung dieses Verfahrens wird an dieser Stelle auf das Kapitel 3.2 verwiesen.

Um die unterschiedlichen **Lebensdauern** der verschiedenen Technologien zu berücksichtigen, wird in [183] empfohlen, zunächst für die zu untersuchenden Technologien einen gemeinsamen Untersuchungszeitraum zu wählen und nach folgendem Verfahren vorzugehen:

- a) Ist der gemeinsame Untersuchungszeitraum größer als die wirtschaftliche Nutzungsdauer der zu untersuchenden Technologie, wird die Investition für die Technologie wiederholt.
- b) Ist nach Ablauf des gemeinsamen Untersuchungszeitraum noch nicht das Ende der wirtschaftlichen Nutzungsdauer erreicht, wird der Restwert (RW) mit folgendem Näherungsverfahren ermittelt.

$$RW = \frac{AI_{\text{gesamt}} - u \cdot AB_{\text{jährlich}}}{(1+z)^u} \quad (2.2)$$

$AI_{\text{gesamt}}$  Anfangsinvestition/Herstellungskosten

$AB_{\text{jährlich}}$  jährlicher Abschreibungsbetrag bei linearer Abschreibung

Für den Fall, dass die Lebensdauer der neuen Technologien länger ist als der Untersuchungszeitraum, muss der Restwert noch vom Barwert subtrahiert werden.

### Statische Investitionsrechnung

Bei den Modellen der statischen Investitionsrechnung werden die Ein- und Auszahlungen auf eine einzige Periode bezogen. Dies kann die erste oder eine Durchschnittsperiode sein. Bei der **Kostenvergleichsrechnung** sind dies häufig die Kosten der ersten Periode, gegliedert nach Kapital- und Betriebskosten [295]. In Anlehnung an die Kostenvergleichsrechnung werden bei den statischen Verfahren zur Ermittlung der Gesamtkosten über die Lebensdauer ( $GK_{\text{statisch}}$ ) alle Auszahlungen und Einnahmen über die Lebensdauer berücksichtigt.

$$GK_{\text{statisch}} = \sum_{i=0}^u AI_i + ABS_i + AS_i - EK_i \quad (2.3)$$

Die **Lebensdauer** wird in diesem Verfahren insofern berücksichtigt, als dass die Kosten über die Lebensdauer ( $GK_{\text{statisch}}$ ) ins Verhältnis zu dem umweltrelevanten Nutzen über die gleiche Lebensdauer gesetzt werden. Eine Restwertermittlung wie bei den dynamischen Verfahren ist daher nicht erforderlich.

Vor einer endgültigen Auswahl eines praktikablen Verfahrens der Umweltbewertung und der Investitionsrechnung wird im folgenden Kapitel 3 die Methodik der Kosten-Nutzen-Analyse beschrieben. Aufbauend auf den Grundlagen der Umweltbewertung (Kapitel 3.1) und der Vermeidungskostenrechnung (Kapitel 3.2) wird dann auch eine begründete Auswahl für den konkreten Vermeidungskostenansatz gewählt.



### 3 Methodik der Kosten-Nutzen-Analyse

Als standardisiertes Verfahren zur vergleichenden Bestimmung der Umweltverträglichkeit neuer Antriebe und neuer Energieträger im Straßenverkehr soll ein Kosten-Nutzen-Vergleich durchgeführt werden. Bei der Kosten-Nutzen-Analyse werden die Vermeidungskosten ermittelt. Dies ist der Quotient aus Kosten und (Umwelt-)Nutzen im Vergleich zu einer festgelegten Referenz. Dabei ist zunächst die Ermittlung der Umweltwirkungen notwendig. Hierbei wird die Methodik der Ökobilanz verwendet, deren systematischer Aufbau in Kapitel 3.1 beschrieben wird. Die Berechnungsgrundlagen für die Ermittlung von Vermeidungskosten und die Anforderungen an deren Bewertung werden in Kapitel 3.2 dargestellt.

#### 3.1 Systematischer Aufbau einer Ökobilanz

Grundsätzlich steht für die Bewertung der Umweltverträglichkeit neuer Antrieb und Energieträger im Verkehr das Instrument der Produktökobilanz ([79], [80], [81], [82]) zur Verfügung. Alle folgenden allgemeinen Erläuterungen verweisen auf eine tabellarische Zusammenfassung in Tab. 3-1. Darüber hinaus werden in den Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.11 die Wirkungskategorien und notwendige Berechnungsgrundlagen beschrieben, die ebenfalls bereits in Tab. 3-1 zusammengefasst sind.

Produktökobilanzen werden in vier unterschiedliche Arbeitsschritte unterteilt (Abb. 3-1), die zunächst kurz beschrieben werden [190].

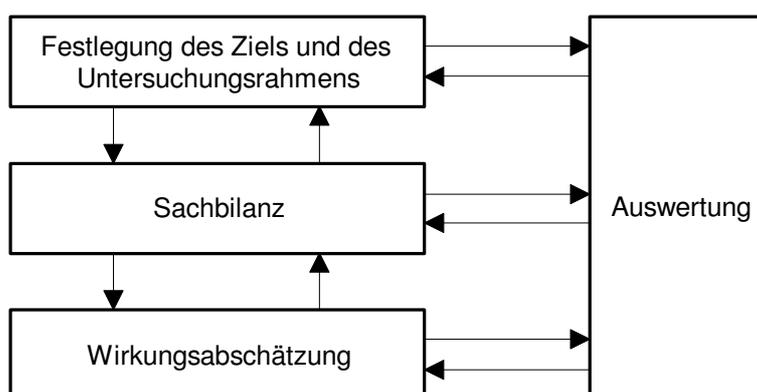


Abb. 3-1: Bestandteile einer Produktökobilanz nach DIN EN ISO 14040 [79]

Tab. 3-1: Definitionen der Wirkungskategorien, der allgemeinen und auf den Pkw im Jahr 2010 bezogener Prioritäten, der Sachbilanzparameter, der Ortsklassen und der Wirkungsindikatoren einer Ökobilanz

A	B	C	D	E	F	G
Wirkungskategorie	Allgemeine Prioritäten <sup>1)</sup> wegen			Parameter der Sachbilanz	Ort der Wirkung <sup>3)</sup>	Wirkungsindikator <sup>4)</sup>
	ökologischer Gefährdung	Abstandes zum Ziel	spezifischen Wirkungs- beitrages für Pkw 2010 <sup>2)</sup>			
1. Ressourcenbeanspruchung	MITTEL	GROSS	SEHR GROSS	nicht-erneuerbare Energie	Global OK I-III	Kumulierter Energieaufwand
2. Treibhauseffekt	SEHR GROSS	SEHR GROSS	SEHR GROSS	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O <sup>6)</sup>	Global OK I-III	CO <sub>2</sub> -Äquivalent
3. Stratosphärischer Ozonabbau	SEHR GROSS	GERING	GROSS	FCKW, N <sub>2</sub> O	Global OK I-III	FCKW 11-Äquivalent und N <sub>2</sub> O-Emission
4. Direkte Humantoxizität	_5)			Partikelkern, NO <sub>2</sub> , Formaldehyd	Lokal OK I	Relative toxische Potenz, Beurteilungswerte
4.1. Kanzerogenität	SEHR GROSS	SEHR GROSS	k.A.	Dieselpartikel, Benzol, BaP	Lokal OK I	Unit Risk-Faktor
5. Direkte Ökotoxizität	_5)			-	Lokal, regional OK I, I-II	_5)
6. Photochemische Oxidantienbildung	GERING	GROSS	GROSS	NO <sub>x</sub> , NMHC	Lokal, regional OK I, I-II	NCPOCP-Äquivalent
7. Versauerung	GROSS	GROSS	MITTEL	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub> , HCl	Lokal, regional OK I, I-II	SO <sub>2</sub> -Äquivalent
8. Eutrophierung	GROSS	GROSS	GROSS	NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub>	Lokal, regional OK I, I-II	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äquivalent
8.1. Aquatische Eutrophierung	GROSS	MITTEL	GROSS	NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub>	Lokal, regional OK I, I-II	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äquivalent
8.2. Terrestrische Eutrophierung	GROSS	GROSS	GROSS	NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub>	Lokal, regional OK I, I-II	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äquivalent
9. Naturraumbeanspruchung (Fläche)	SEHR GROSS	GROSS	GROSS	Fläche	Lokal, regional OK I, I-II	Flächenbeanspruchung (zeitbewertet)
10. Lärm	SEHR GROSS	SEHR GROSS	SEHR GROSS	Lärmpegel	Lokal OK I	Lärmpegel

<sup>1)</sup> Priorität sehr groß, groß, mittel, gering, sehr gering  
Verwendung von Vorschlägen des UBA [251] für Ökologische Gefährdung und Abstand zum Ziel sowie Berechnungen des ifeu [122], Kanzerogenität: eigene Bewertung

<sup>2)</sup> Ermittlung des spezifischen Wirkungsbeitrages nur für Pkw-Verkehr im Bezugsjahr 2010 ([122], Anhang, Tab. 7-2)

<sup>3)</sup> OK I: Emissionen in der Ortsklasse I (lokal-städtisch)  
OK I – III: Summe aller Emissionen in der Ortsklasse I (lokal-städtisch), Ortsklasse II (regional-ländlich) und Ortsklasse III (überregional-global)

OK I – II: Summe aller Emissionen in der Ortsklasse I (lokal-städtisch) und Ortsklasse II (regional-ländlich)

<sup>4)</sup> Die Zusammenstellung der Äquivalenzfaktoren findet sich im Anhang in Tab. 7-3a bis Tab. 7-3c

<sup>5)</sup> Da für die Sachbilanzergebnisse in dieser Wirkungskategorie keine Äquivalenzfaktoren verfügbar sind, muss die Auswertung auf die Sachbilanzergebnisse beschränkt bleiben. Eine Darstellung der Priorität ist daher nicht möglich.

<sup>6)</sup> In dieser Bilanz bleiben die Klimagase FKW (perfluorierte Kohlenwasserstoffe), HFKW (wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe) und SF<sub>6</sub> (Schwefelhexafluorid) zunächst unberücksichtigt.

### 1. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

Zunächst werden sowohl Hintergrund, Zweck und Zielgruppe der Studie festgelegt, als auch die funktionale Einheit, die gesamten Lebenswege, geographische und zeitliche Systemgrenzen, betrachtete Umweltwirkungskategorien und Parameter definiert [80].

### 2. Sachbilanz

Die Erstellung der Sachbilanz umfasst das Sammeln und Aufbereiten der spezifischen Lebenswegdaten für den vorgegebenen Untersuchungsrahmen. Hierzu gehört die qualitative Beschreibung der gesamten Lebenswege der betrachteten Produkte, die Entwicklung eines Modells zur quantitativen Beschreibung, die Erhebung spezifischer Daten (z.B. Energieverbrauch, Emissionen) für die Einzelprozesse der Lebenswege und die Verknüpfung aller Daten zu Sachbilanzen für Lebenswegbilanzen von Produkten (Tab. 3-1, Spalte E) [80].

### 3. Wirkungsabschätzung

In der Wirkungsabschätzung werden die in der Sachbilanz erfassten Parameter in Umweltwirkungen übertragen und ggf. verschiedene Wirkungen zueinander in Relation gesetzt. Die Wirkungsabschätzung beinhaltet folgende Teilschritte [81].

- Auswahl von Wirkungskategorien (Tab. 3-1, Spalte A),
- Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den Wirkungskategorien (Klassifizierung, Tab. 3-1, Spalte E),
- Zusammenführung der Sachbilanzergebnisse über geeignete Äquivalenzfaktoren zu Wirkungsindikatoren (Charakterisierung, Tab. 3-1, Spalte G).

Da nicht in allen Wirkungskategorien für die verschiedenen Sachbilanzergebnisse Äquivalenzfaktoren verfügbar sind, ist eine Bewertung aller Wirkungskategorien durch eine Zusammenführung der Sachbilanzdaten nicht immer möglich.

Darüber hinaus können die Ergebnisse in den Wirkungskategorien auf eine Referenz bezogen, d.h. normiert werden und nach ihrer **Priorität** (fünf Stufen: „sehr groß“ bis „sehr gering“) bewertet werden [251]. Die Prioritäten der Wirkungskategorien werden danach beurteilt,

- (1) für wie schwerwiegend die mit ihnen verbundenen Schäden in einer qualitativen Bewertung auf die ökologischen Schutzgüter einzuschätzen sind (**ökologische Gefährdung**, Tab. 3-1, Spalte B),
- (2) wie weit der gegenwärtige Umweltzustand vom angestrebten Umweltqualitätsziel entfernt ist (**Abstand zum Ziel**, Tab. 3-1, Spalte C) und
- (3) wie groß der **spezifische Wirkungsbeitrag (Normierung)** bezogen auf die aktuelle in der Gesamtschau bewerteten Umweltsituation in der betreffenden Wirkungskategorie ist (Tab. 3-1, Spalte D).

Den **spezifischen Wirkungsbeitrag** (3) ermittelt man dabei aus dem Verhältnis des Indikatorergebnisses jeder einzelnen Wirkungskategorie in dem zu untersuchenden Sektor eines zeitlich und räumlich abgegrenzten Untersuchungsgebietes (z.B. Klimagasemission des Straßenver-

kehr) zum Indikatorergebnis derselben Wirkungskategorie bezogen auf die Gesamtheit eines zeitlich und räumlich abgegrenzten Untersuchungsgebietes (z.B. jährliche Summe aller Klimagasemissionen in Deutschland) wie folgt:

$$\text{spez. Beitrag}_k = \frac{IE_{k, \text{funktionelle\_Einheit}}}{IE_{k, \text{jaehrlich\_Deutschland}}} = \frac{\sum_l m_{l, \text{funktionelle\_Einheit}} \cdot CF_{kl}}{\sum_l m_{l, \text{jaehrlich\_Deutschland}} \cdot CF_{kl}} \quad (3.1)$$

$IE_{k, \text{funktionelle\_Einheit}}$	Indikatorergebnisse in der Wirkungskategorie k in einem Sektor eines zeitlich und räumlich abgegrenzten Untersuchungsgebietes
$IE_{k, \text{jaehrlich\_Deutschland}}$	Indikatorergebnisse in der Wirkungskategorie k in der Gesamtheit eines zeitlich und räumlich abgegrenzten Untersuchungsgebietes
$m_{l, \text{funktionelle\_Einheit}}$	Stoffstrom des Stoffes l in einem Sektor eines zeitlich und räumlich abgegrenzten Untersuchungsgebietes
$m_{l, \text{jaehrlich\_Deutschland}}$	Stoffstrom des Stoffes l in der Gesamtheit eines zeitlich und räumlich abgegrenzten Untersuchungsgebietes
$CF_{kl}$	Charakterisierungsfaktor der Wirkungskategorie k bezüglich des Stoffes l

Bei der Rangbildung der Ergebnisse unterschiedlicher Wirkungskategorien ist ein Indikatorergebnis hierbei als um so bedeutender einzustufen, je größer es im Vergleich zu der pro Jahr in Deutschland gemessenen Gesamtbelastung dieser Wirkungskategorie ist (vgl. Anhang, Tab. 7-2 nach [122]).

#### 4. Auswertung

In der Auswertung werden die Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung zusammengefasst und beurteilt. In diesem Abschnitt erfolgt auch eine Diskussion der Ergebnisse und der aus den Ergebnissen ableitbaren Aussagen, die zu Handlungsempfehlungen zusammengefasst werden können.

Aus der Zusammenfassung der einzelnen ökologischen Prioritäten (ökologische Gefährdung, Abstand zum Ziel, spezifischer Wirkungsbeitrag) in Tab. 3-1 wird eine arithmetisch gemittelte **allgemeine ökologische Priorität** berechnet (siehe auch Tab. 4-17, Seite 121), die für die abschließende Bewertung in Szenarien genutzt wird.

In den folgenden Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.10 werden die Berechnungsgrundlagen für die verschiedenen Wirkungskategorien und in Kapitel 3.1.11 die Grundlagen der räumlichen Zuordnungen der Umweltwirkungen beschrieben. Anschließend erfolgt in Kapitel 3.2 die Auswahl der Vermeidungskostenrechnung.

### 3.1.1 Ressourcenbeanspruchung

In dieser thematisch sehr weit gefassten Wirkungskategorie ist in einer Ökobilanz nur eine klar definierte und inhaltlich abgegrenzte Bewertung des Ressourcenverbrauches in den Kategorien Energie (nicht-erneuerbare und erneuerbare Energie), Material (Erz, Wasser, Holz, z.T. Energie, etc.) und Naturraum (Fläche, Boden, genetische Vielfalt, Flora, etc.) möglich. Die Einflüsse auf Naturraumressourcen werden in der Wirkungskategorie „Naturraumbeanspruchung“ (Kapitel 3.1.9) dargestellt.

Energieressourcen können durch einen gemeinsamen Indikator, der den Energieaufwand zur Bereitstellung und Nutzung eines Produktes beschreibt, dargestellt werden. Zur Ermittlung der Ressourcenbeanspruchung sind daher keine Modelle für Ursache-Wirkungsbeziehungen erforderlich.

Bei der Ermittlung des Energieressourcenverbrauches wird der spezifische Energieinhalt der verwendeten Energieressourcen, ausgedrückt als spezifischer Heizwert ( $H_u$ ), verwendet (Anhang, Tab. 7-1). Darüber hinaus sollen jedoch, sofern möglich, alle energetischen Aufwendungen zur Herstellung und Bereitstellung sowie ggf. Entsorgung von Energieträgern und Produkten berücksichtigt werden. Hierzu verwendet man den kumulierten Energieaufwand (KEA), der für die Bereitstellung und Nutzung von Energieträgern und Produkten berechnet werden kann:

$$KEA = KEA_{\text{nicht-erneuerbar}} + KEA_{\text{erneuerbar}} + KEA_{\text{andere}} \quad (3.2)$$

$KEA_{\text{nicht-erneuerbar}}$	kumulierter Energieaufwand unter Berücksichtigung nicht-erneuerbarer und nuklearer Primärenergie
$KEA_{\text{erneuerbar}}$	kumulierter Energieaufwand unter Berücksichtigung erneuerbarer Primärenergie
$KEA_{\text{andere}}$	kumulierter Energieaufwand unter Berücksichtigung energetisch genutzter Reststoffe (z.B. Müll)

Die verschiedenen Arten des kumulierten Energieaufwandes werden durch Summenbildung über den Energieverbrauch ermittelt:

$$KEA = \sum_{i=1}^n m_i \cdot KEA_{\text{nicht-erneuerbar}_i} + \sum_{i=1}^n m_i \cdot KEA_{\text{erneuerbar}_i} + \sum_{i=1}^n m_i \cdot KEA_{\text{andere}_i} \quad (3.3)$$

$m_i$	Stoffstrom des spezifischen Sachbilanzparameters mit kumuliertem Energieaufwand $i$
-------	---

Der kumulierte Energieaufwand von Materialien, die sowohl stofflich als auch energetisch eingesetzt werden können (z.B. Holz als Baumaterial oder als Energierohstoff zur Verbrennung), wird nur dann bilanziert, sofern sie energetisch genutzt werden.

Die Beschreibung der durch die Anwendung eines Produktes auftretenden Wirkungen auf die **Materialressourcen** berücksichtigt den durch die Herstellung und Nutzung verbundenen

Verbrauch an Rohstoffen (Erze, Wasser, etc.). Sinnvoll ist jedoch nur eine Erhebung der Sachbilanz, da die Zusammenfassung der Ergebnisse, z.B. in einer einzelnen Wirkungskategorie unter Anwendung von Wirkungsindikatoren, nicht möglich ist.

### 3.1.2 Treibhauseffekt

Das Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) ist ein internationales Fachgremium, das die Methodik und die Kennzahlen für klimawirksame Substanzen errechnet und fortschreibt. Die Berechnung des Global Warming Potentials (GWP) als CO<sub>2</sub>-Äquivalent wird in Modellrechnungen ermittelt (Tab. 7-3a, Anhang). Die treibhausrelevante Wirkung der Gase wird durch Summenbildung aus dem Produkt des Schadstoffes und dem jeweiligen CO<sub>2</sub>-Äquivalent ermittelt.

$$GWP = \sum_{i=1}^n m_i \cdot GWP_i \quad (3.4)$$

GWP <sub>i</sub>	Global Warming Potentials (Treibhauspotential) für den Sachbilanzparameter i (Tab. 7-3a, Anhang)
m <sub>i</sub>	Stoffstrom des spezifischen Sachbilanzparameters mit Treibhauswirkung i

### 3.1.3 Stratosphärischer Ozonabbau

Der stratosphärische Ozonabbau wird in erster Linie durch die in der „Liste von Montreal“ und in Zusatzprotokollen festgelegten Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) und durch einige schwer abbaubare Chlor- und Bromkohlenwasserstoffe verursacht. Als Referenz zur Ermittlung des Ozonabbaupotentials (ODP, Ozone Depletion Potential) wird Trichlorfluormethan (FCKW 11) gewählt. Eine Liste der wichtigsten Stoffe findet sich in Tab. 7-3a (Anhang). Die Berechnung erfolgt durch die Summe der Produkte der einzelnen Frachten und der jeweiligen relativen ODP.

$$ODP = \sum_{i=1}^n m_i \cdot ODP_i \quad (3.5)$$

ODP <sub>i</sub>	Ozone Depletion (Ozonabbau) Potential für den Sachbilanzparameter i (Anhang, Tab. 7-3a)
m <sub>i</sub>	Stoffstrom des spezifischen Sachbilanzparameters mit ozonabbauender Wirkung i

Grundsätzlich ist bei der Bilanzierung der Umweltwirkungen bei den Abgasemissionen des Fahrzeugbetriebes nicht mit FCKW-Emissionen zu rechnen. Durch den Fahrzeugbetrieb und die Herstellung der Treibstoffe werden jedoch Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) Emissionen mit ozonabbauender Wirkungen verursacht. Ein Ozonabbaupotential mit Bezug auf FCKW 11 existiert für

N<sub>2</sub>O nicht. Für die ozonabbauende Wirkung von N<sub>2</sub>O kann kein ODP berechnet werden, da diese auch von den Konzentrationen weiterer Stoffe in der Atmosphäre abhängig ist, durch deren Reaktionen mit N<sub>2</sub>O weitere Primär- und Sekundärreaktionen zwischen N<sub>2</sub>O und O<sub>3</sub> verbunden sind. Der stratosphärische Ozonabbau wird in dieser Arbeit ausschließlich als N<sub>2</sub>O-Emission bilanziert.

### 3.1.4 Direkte Humantoxizität (relative Toxizität)

Bei der Ermittlung der direkten Humantoxizität soll in dieser Arbeit die relative toxische Wirkung und die relative kanzerogene Wirkung (vgl. Kapitel 3.1.5) ermittelt werden. Die bewerteten Abgasbestandteile können oberhalb einer bestimmten Konzentrationsschwelle z.B. zu Atemwegserkrankungen, Herz-Kreislaufkrankungen oder sensibilisierenden Wirkungen führen. Als Maßstab wurde in [243] eine relative toxische Potenz abgeleitet. Dabei werden die spezifischen Emissionen ins Verhältnis zu einer diesbezüglich relevanten Konzentrationsschwelle, die im weiteren als Beurteilungswert bezeichnet wird, gesetzt. Die Beurteilungswerte wurden entweder aus Tierversuchen ermittelt und unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren auf den Menschen übertragen oder anhand von Erfahrungen am Menschen abgeleitet. Bei diesen Beurteilungswerten geht man allgemein davon aus, dass bei Einhaltung der toxikologisch begründeten Werte keine Wirkungen mehr auftreten. Um aber einen Vergleich mit anschaulichen Zahlen zu ermöglichen, wurde in [243] die Methode der sogenannten kritischen Volumina ([39], [238]) verwendet, die bei der toxikologischen Bewertung von Luftschadstoffen in Ökobilanzen eingesetzt wurde. Das kritische Volumen gibt das Luftvolumen an, mit dem die jeweils emittierte Schadstoffmenge verdünnt werden muss, damit der jeweilige Beurteilungswert, oberhalb dessen Grenze eine toxikologische Wirkung auftritt, eingehalten wird. Je höher das kritische Volumen ist, um so höher ist die Toxizität des Stoffes. Die Beurteilungswerte wurden in [243] anhand von Daten der WHO abgeleitet.

$$\text{RTP}_i = \frac{m_i}{B_i} \quad (3.6)$$

RTP <sub>i</sub>	Relative toxische Potenz für den Sachbilanzparameter i
m <sub>i</sub>	Stoffstrom des spezifischen Sachbilanzparameters mit toxischer Wirkung i
B <sub>i</sub>	Beurteilungswert der relativen toxischen Potenz gemäß Anhang, <u>Tab. 7-3a</u>

Eine Summenbildung über die Substanzen mit toxischer Wirkung ist nicht möglich, da mit den Emissionen der einzelnen Substanzen unterschiedliche humantoxische Wirkungen verbunden sind. Praktisch bedeutet dies, dass verschiedene Zielorgane oder Endpunkte von den verschiedenen Luftschadstoffen betroffen sind.

Da in [243] bereits ermittelt wurde, dass sich bei der Bewertung von Kraftfahrzeugen die höchsten relativen toxischen Potenzen, wegen der mengenmäßigen Bedeutung der Emissionen, für NO<sub>2</sub>, Partikel und Formaldehyd ergeben, werden im Zuge dieser Arbeit auch nur diese Abgas-

komponenten und deren humantoxische Potenz bewertet. Da bei den untersuchten Pkw nicht zu erwarten ist, dass signifikante Mengen an Schwermetallemissionen mit humantoxischer Wirkung, wie Quecksilber und Blei (z.B. Batterien), aus dem Herstellungsprozess oder bei der Entsorgung in industriellen Feuerungsanlagen freigesetzt werden, bleiben diese im Zuge der Modellierungen vernachlässigt.

### 3.1.5 Kanzerogenität (relative kanzerogene Potenz)

Neben der direkten Humantoxizität (Kapitel 3.1.4) kann eine relative kanzerogene Potenz ermittelt werden, deren Wirkung auf Stoffe mit lokaler Reichweite bezogen ist (vgl. Kapitel 3.1.11). Im Straßenverkehr gehören hierzu die Bestandteile mit kanzerogener Wirkung aus den direkten Abgasemissionen. Die Maßzahl der relativen kanzerogenen Potenz, die man auch als relative kanzerogene Wirkungsstärke bezeichnet, ergibt sich zunächst aus dem Produkt der Emission und dem Unit Risk Faktor. Nach [243] können folgende Definitionen, Berechnungsverfahren und einschränkende Hinweise zur Interpretation der Ergebnisse gegeben werden.

Bei der relativen kanzerogenen Potenz handelt es sich um ein zusätzliches Krebsrisiko, das wegen des derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstandes unter dem Gesichtspunkt des Gesundheitsschutzes als Beurteilungsmaßstab für den einzelnen Exponierten anzunehmen ist. Das konkrete Individualrisiko ist von weiteren Faktoren, wie der genetischen Prädisposition abhängig.

Das Unit Risk beschreibt eine Dosis-Wirkung Beziehung als geschätztes zusätzliches Krebsrisiko, bei der unter definierten Randbedingungen und unter Berücksichtigung einer definierten Dosis bei konstanter Exposition und unter Berücksichtigung eines definierten Zeitraumes von 70 Jahren eine kanzerogene Wirkung eintritt. Bei den Unit Risk-Schätzungen handelt es sich überwiegend um Werte des LAI [157], die aber nicht in allen Fällen als statistische Obergrenze berechnet wurden [243].

$$\text{RKP} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \text{UR}_i \cdot 1.000 \quad (3.7)$$

RKP	Relative kanzerogene Potenz
$m_i$	Stoffstrom des spezifischen Sachbilanzparameters mit kanzerogener Wirkung i
$\text{UR}_i$	Unit Risk Faktor gemäß Anhang, <u>Tab. 7-3b</u>

Bei der relativen kanzerogenen Potenz geht man davon aus, dass die verschiedenen kanzerogen wirkenden Abgasbestandteile eine identische kanzerogene Wirkung, nämlich eine Tumorstoffwirkung, verursachen. Damit ist es möglich die kanzerogenen Potenzen einzelner Abgasbestandteile zu einer Summe zusammenzufassen. Es ist zu berücksichtigen, dass sich die Vergleiche nur unter der Voraussetzung als relative Risiken interpretieren lassen, sofern davon ausgegangen wird, dass sich die für die Unit Risk Ermittlung erforderlichen Immissionen proportional zu den für die Stoffströme relevanten Emissionen verhalten.

Berechnungen in [243] für Pkw mit Verbrennungskraftmaschinen der Stufe EURO 4 zeigen, dass mehr als 95% der relativen kanzerogenen Potenz von Otto- und Diesel-Pkw durch Partikel, Benzol und Benz(a)pyren verursacht werden. Darüber hinaus werden Formaldehydemissionen berücksichtigt, da sie für die Berechnung der relativen toxischen Potenz (Kapitel 3.1.4) vorliegen.

Bei der Interpretation der Werte darf auch nicht übersehen werden, dass im Unit Risk nicht nur der Bezug auf eine Expositionskonzentration enthalten ist, sondern dass sich das Risiko außerdem auf eine kontinuierliche Exposition über 70 Jahre bezieht. Dies bedeutet, dass auch bei Kenntnis der Immissionskonzentrationen nur das Szenario einer kontinuierlichen Exposition beschrieben wird.

### 3.1.6 Photochemische Oxidantienbildung

Wegen der komplexen und zeitlich variierenden Reaktionen bei der Bildung von bodennahem Ozon ist die Modellierung der Bildung von Ozon als Sekundärschadstoff aus unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen und Stickstoffoxiden schwierig. Grundsätzlich sind die im Zuge der Wirkungsabschätzung verwendeten Ozonbildungspotentiale als Ethenäquivalent (POCP, siehe Anhang, Tab. 7-3b) umstritten, da sie auf der Änderung bestehender Ozonkonzentrationen aufbauen und für regional weiträumige Ausbreitungsrechnungen entwickelt wurden. Sie berücksichtigen nur den Wirkungsbeitrag der Kohlenwasserstoffe in einer weiträumigen Ausbreitungsrechnung, nicht aber die Beiträge der Stickstoffoxide.

$$POCP = \sum_{i=1}^n m_i \cdot POCP_i \quad (3.8)$$

POCP <sub>i</sub>	Photochemical Ozone Creation (Photooxidantien) Potential für den Sachbilanzparameter i (Anhang, Tab. 7-3b)
m <sub>i</sub>	Stoffstrom des spezifischen Sachbilanzparameters mit Photosmogwirkung i

Der POCP-Wert dient als Grundlage zur Berechnung des mit Stickstoffoxid korrigierten NCPOCP-Wertes, der aus dem PCOP und der jeweils in diesem System gleichzeitig emittierten Stickstoffoxidemissionen ermittelt wird.

$$NCPOCP = \sqrt{NO_x \cdot \sum_{i=1}^n (m_i \cdot POCP_i)} \quad (3.9)$$

NCPOCP	NO <sub>x</sub> -korrigiertes Photooxidantien Potential für das zu untersuchende System
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxidemission

Die Herstellung eines linearen Zusammenhanges zwischen der photochemischen Oxidantienbildung unterschiedlicher Kohlenwasserstoffe und der Stickstoffoxide zeigt jedoch prinzipielle

Schwächen [224]. Die Summe der NCPOCP einzelner Sektoren ist nicht identisch mit den NCPOCP für den gesamten Bilanzraum. Somit sind die Ergebnisse zur photochemischen Oxidantienbildung nur begrenzt aussagekräftig ([255], [256]).

### 3.1.7 Versauerungspotential

Der Versauerungsprozess findet sowohl in Gewässern als auch in Böden statt. Das Säurebildungspotential (AP) wird stoffspezifisch in Form von SO<sub>2</sub>-Äquivalenten ermittelt (Anhang, Tab. 7-3c) und als Summe aus den Produkten von SO<sub>2</sub>-Äquivalent und Schadstoffmasse ermittelt.

$$AP = \sum_{i=1}^n m_i \cdot AP_i \quad (3.10)$$

AP <sub>i</sub>	SO <sub>2</sub> -Äquivalent (Säurebildungspotential) für den Sachbilanzparameter i (Anhang, Tab. 7-3c)
m <sub>i</sub>	Stoffstrom des spezifischen Sachbilanzparameters mit Versauerungswirkung i

### 3.1.8 Eutrophierung

Die Eutrophierung beschreibt die übermäßige Nährstoffzuführung in Gewässer und Böden. Zunächst wird vereinfachend unterstellt, dass alle luftseitig emittierten Nährstoffe zu einer Überdüngung der Böden (terrestrische Eutrophierung) und alle wasserseitig eingebrachten Nährstoffe zu einer Überdüngung der Gewässer (aquatische Eutrophierung) führen [256]. Jeweils für Böden und Gewässer berechnet sich der Wirkungsbeitrag zur Eutrophierung als Phosphat-Äquivalent (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) durch Multiplikation der einzelnen Frachten mit der Abgasemission.

$$NP = \sum_{i=1}^n m_i \cdot NP_i \quad (3.11)$$

NP <sub>i</sub>	Eutrophierungspotential für den Sachbilanzparameter i (Anhang, Tab. 7-3c)
m <sub>i</sub>	Stoffstrom des spezifischen Sachbilanzparameters mit eutrophierender Wirkung i

### 3.1.9 Naturraumbeanspruchung, Flächenverbrauch

Die Naturraumbeanspruchung zielt in der Regel auf die Bewertung der mit der Herstellung, Nutzung oder Entsorgung eines Produktes verbundenen Flächennutzung. Aufbauend auf den Vorschlägen in [238] kann eine Differenzierung der Flächen nach ihrem Natürlichkeitsgrad vorgenommen werden (z.B. [255], [256]). Grundsätzlich unterschieden werden dabei sieben sog. Natürlichkeitsklassen, von der Natürlichkeitsklasse I (über lange Zeit keine Nutzung, unbe-

einflusstes Ökosystem, Urwald) bis zu der Natürlichkeitsklasse VII (langfristig versiegelte oder degradierte Flächen) [104]. Dieses Verfahren ist für den Vergleich neuer Technologien im Straßenverkehr wenig praktikabel und wird daher nicht angewendet. Damit bleibt auch eine Bewertung der landwirtschaftlichen Flächenbeanspruchung durch die Nutzung biogener Treibstoffe im Vergleich zur industriellen Flächennutzungen bei der Verwendung konventioneller Kraftstoffe im Rahmen der Modellentwicklung unberücksichtigt.

Als Alternative zu dem Bewertungsverfahren der Naturraumbeanspruchung gibt es weitere Untersuchungen zum spezifischen Flächenverbrauch des motorisierten Verkehrs ([11], [18], [20], [27], [110]) aus deren Zusammenfassung ein Bewertungs- und Berechnungsverfahren entwickelt wurde [257]. Dabei wird verkehrsmittelspezifisch der fließende und der ruhende Verkehr auf die Fahrzeugfläche bezogen. Die Flächenbewertung umfasst aus Sicht der Flächennachfrage zwei Merkmale,

- die Flächenbeanspruchung durch den fließenden Verkehr und
- die Flächenbeanspruchung durch den ruhenden Verkehr.

Die Intensität der Flächennutzung ( $FI_i$ ) durch den fließenden Verkehr der verschiedenen Verkehrsträger ist besonders im städtischen Raum von Interesse. Sie ist abhängig vom Maß der Leistungsfähigkeit der Infrastruktur, der mittleren Geschwindigkeit und der erforderlichen Breite der Fahrzeuge ([257], [110]):

$$FI_i = \frac{v_i \cdot b_{erf\_i}}{D_i} \quad (3.12)$$

$v_i$	mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsträgers i
$b_{erf\_i}$	erforderliche mittlere Breite des Verkehrsträgers i
$D_i$	Durchlassfähigkeit der Infrastruktur für die Verkehrsart i

Die Berechnungsgrundlagen und die Ergebnisse der Flächennutzungsintensität sind in Tab. 7-4 (Anhang) zusammengefasst. Will man die zeitlich begrenzte Beanspruchung einer Fläche berücksichtigen, so ist die durchschnittliche Entfernung und die durchschnittliche Zeit zur Überwindung der Distanz zu berücksichtigen. Aus dem Produkt der Flächennutzungsintensität und der durchschnittlichen Wegezeit ergibt sich die zeitbewertete Intensität der Flächennutzung ( $FI_t$ ).

$$FI_t = \frac{s_x \cdot b_{erf\_i}}{D_i} \quad (3.13)$$

$s_x$	mittlere Wegelänge der Entfernungsklasse x
-------	--

Die weiteren Berechnungsgrundlagen und Ergebnisse zur zeitbewerteten Intensität der Flächennutzung sind in Tab. 7-5 (Anhang) zusammengefasst.

Um den Flächenbedarf durch den ruhenden Verkehr zu berücksichtigen, können durchschnittliche Werte aus [110] für den zeitbewerteten Flächenbedarf der einzelnen Verkehrsmittel übernommen werden (Tab. 7-6, Anhang). Dabei finden statistische Gesichtspunkte, wie Besetzungsgrad, durchschnittliche Anzahl der Fahrten pro Tag und durchschnittliche Anzahl der bereitgestellten Parkplätze Berücksichtigung.

### 3.1.10 Lärmbelastung

Unter Lärm ist jede Art von Geräusch zu verstehen, das unerwünscht ist, stört oder belästigt und das physische, psychische und soziale Wohlbefinden beeinträchtigt. Im Rahmen einer Ökobilanz ist vorgesehen, die Lärmbelastungen durch die Ermittlung der mit dem Produkt verbundenen Schallemissionen zu erfassen [238]. Andererseits gibt es bislang kein nachvollziehbar praktiziertes oder weitgehend akzeptiertes Ökobilanz-Verfahren zur Erfassung von Lärm [122].

Für den konkreten Fall der Bewertung von Kraftfahrzeugen wurden bisher Schalldruckpegel nach Richtlinie 92/97/EWG [3], bei verschiedenen Fahrsituationen ([63], [129]) oder Mittelungspegel in einem repräsentativen städtischen Straßenzug auf der Basis von Modellberechnungen eines Computermodells zur Überprüfung der Wirkungen kommunaler verkehrspolitischer Maßnahmen (CITAIR) ermittelt [131]. Im letztgenannten Verfahren diente als repräsentativer Vergleichsmaßstab die Zahl der Personen, die in einer betrachteten Stunde durch eine zweispurige Hauptverkehrsstraße (mit Asphaltdecke) in der Innenstadt mit geringen Störungen des Verkehrsflusses fahren. In dieser Arbeit werden im Modell Schalldruckpegel verschiedener Fahrsituationen und Mittelungspegel in einem repräsentativen städtischen Straßenzug berücksichtigt.

### 3.1.11 Ortsklassen

Um eine undifferenzierte Summierung aller Emissionen einer Wirkungskategorie über alle Orte der Emissionen zu vermeiden, hat das ifeu ein Verfahren entwickelt, mit dem der Ort der Emissionen und der Ort der Wirkung näher charakterisiert werden. Zunächst werden drei Ortsklassen, in denen Emissionen auftreten, nach ihrer Bevölkerungsdichte definiert ([63], [122], [144], [187]). Dies erfolgt

- von Gebieten hoher Bevölkerungsdichte (Ortsklasse, OK I)
- über Gebiete mittlerer bis niedriger Bevölkerungsdichte (OK II) bis hin zu
- bevölkerungsfreien Orten oder Orten äußerst niedriger Bevölkerungsdichte (OK III).

Um die Emissionen in den Ortsklassen den verschiedenen Wirkungskategorien zuordnen zu können, ist eine weitere Differenzierung nach

- (1) den verschiedenen Prozessen der Prozesskettenanalyse (Abb. 4-2) und
- (2) nach der Reichweite der Emissionen

erforderlich [122]. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Zuordnungen wird in Tab. 3-2 gegeben.

Tab. 3-2: Zuordnung der Emissionen zu Ortsklassen nach Prozess und Reichweite [122]

Ortsklasse	Zuordnung der Emissionen nach	
	Prozessen der Prozesskette	deren Wirkung/Reichweite
OK I <sup>1)</sup> lokal-städtisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzung der zu untersuchenden Produkte (Kraftfahrzeuge, Antriebe, etc.)</li> <li>• lokale Verteilung von Gütern (Energieträgern, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partikel</li> <li>• Benzol</li> <li>• Benz(a)pyren</li> </ul>
OK II <sup>2)</sup> regional-ländlich	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Industrieprozesse</li> <li>• Energieumwandlungsprozesse (Kraftwerke, Raffinerie, Erdgasreformierung, etc.)</li> <li>• lokale Verteilung von Gütern (Energieträgern, etc.)</li> <li>• teilweise Exploration und Förderung von Rohstoffen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stickstoffoxide</li> <li>• Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC)</li> <li>• Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)</li> <li>• Chlorwasserstoff (HCl)</li> <li>• Ammoniak (NH<sub>3</sub>)</li> </ul>
OK III <sup>3)</sup> überregional-global	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exploration und Förderung von Rohstoffen</li> <li>• Seetransporte von Gütern (Energieträger, Erze, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)</li> <li>• Methan (CH<sub>4</sub>)</li> <li>• Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O)</li> <li>• Fluor-Kohlenwasserstoffe (FKW)</li> <li>• perfluorierte Kohlenwasserstoffe, Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW)</li> </ul>

<sup>1)-3)</sup> Randbedingungen zur Definition der Wirkung/Reichweite:

<sup>1)</sup> OK I: unter 2 km    <sup>2)</sup> OK II: bis 1.000 km    <sup>3)</sup> OK III: über 1.000 km

Bezogen auf die in der zusammenfassenden Tab. 3-1, Spalte A genannten Wirkungskategorien können die Emissionen somit zu Gebieten unterschiedlicher Bevölkerungsdichte zugeordnet (Tab. 3-1, Spalte F) und deren Wirkung weitergehend spezifiziert werden. Die für die anschließende Bewertung notwendigen Zuordnungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- In den Wirkungskategorien Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Stratosphärischer Ozonabbau werden alle Emissionen in den Ortsklassen I bis III (OK I-III) aufsummiert, da deren Wirkung globale Auswirkungen besitzt.
- In den Wirkungskategorien Photochemische Oxidantienbildung, Versauerung, Eutrophierung werden alle lokal-städtischen (OK I) und regional-ländlichen Emissionen (OK II) aufsummiert, da die Emissionen wegen ihrer Reichweite (Tab. 3-2) gleichermaßen wirken. Die überregional-global auftretenden Emissionen (OK III) werden in dieser Arbeit nicht weiter der OK II zugeordnet.

- In den Wirkungskategorien Humantoxizität (Kanzerogenität) und Ökotoxizität werden nur die Emissionen im lokalen Umfeld mit geringer Reichweite in Ortsklasse I (lokal-städtischen) und mit räumlich direkter Wirkung berücksichtigt. Eine räumlich direkte Wirkung ist auch für die Wirkungskategorie Lärm zutreffend.
- Für die zeitbewertete Flächennutzung, die eine Versiegelungswirkung im Verkehr bewertet, ist eine Bewertung der Wirkungen in verschiedenen Ortsklassen nicht sinnvoll.

## 3.2 Darstellung des Vermeidungskostenansatzes

Als Vermeidungskosten wird die Gesamtheit aller Kosten aufgefasst, die mit einer Minderung einer Umweltbelastung (z.B. Emissionsminderung) gegenüber einer Referenzsituation verbunden sind. Die Angabe der Vermeidungskosten bezieht sich in der Regel auf eine spezifische Minderungsmenge einer Maßnahme (z.B. €/t) und setzt durch die Ermittlung der Differenzkosten einen Bezug zur Referenzsituation. So wird eine Vergleichbarkeit verschiedener Maßnahmen zur Minderung der Umweltbelastungen ermöglicht. Alle Maßnahmen, die zu einer Minderung der Umweltbelastung bei niedrigeren Kosten im Vergleich zur Referenz führen (Vermeidungskosten  $< 0$ ) sind im Vergleich zu Maßnahmen mit Vermeidungskosten größer Null günstiger zu bewerten. Zunächst werden in Kapitel 3.2.1 die bekannten Ansätze zur Ermittlung der Vermeidungskosten beschrieben, um in Kapitel 3.2.2 die Aussagen der ermittelten Vermeidungskosten zu bewerten und abschließend einen Vermeidungskostenansatz zu wählen.

### 3.2.1 Berechnung der Vermeidungskosten

Um die Minderungs- oder Vermeidungskosten zu ermitteln, muss zunächst die Umweltwirkung einer Referenz definiert werden. Als Umweltwirkung wird in diesem Fall die Umweltbelastung bezeichnet, die in einer der in folgenden Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.10 beschriebenen, quantifizierbaren Wirkungskategorien ermittelt und auf eine funktionale Einheit (z.B. je km, je kWh) bezogen wird. Nach den Verfahren der Ökobilanz und der Kostenrechnung erfolgt eine Abgrenzung der Systemgrenzen mit Ortsbezug (Kapitel 3.1.11) und Lebensdauerbezug. Beim Vermeidungskostenansatz wird zwischen dem dynamischen und dem statischen Verfahren unterschieden.

#### Dynamischer Vermeidungskostenansatz

Da der dynamische Vermeidungskostenansatz in der Kritik steht, dass alle zukünftigen Kosten auf ein Basisjahr zurückgerechnet werden, wird in [183] vorgeschlagen, nicht nur die Kosten, sondern auch die Umweltwirkungen über die Zeit auf ein Basisjahr mit einem Zinssatz „abzuwerten“. Bei der dynamischen Vermeidungskostenrechnung ergeben sich daher zwei Ansätze zur Ermittlung der Vermeidungskosten (VK).

1. Dynamischer Vermeidungskostenansatz unter Berücksichtigung der Umweltwirkungen *mit* Abdiskontierung auf das Basisjahr.

$$VK_{\text{dynamisch } j}^{\text{UW}_{\text{abdiskontiert}}} = \frac{BW_j - BW_{\text{Referenz}}}{\sum_{i=0}^n \frac{UW_{\text{Referenz}_i}}{(1+z)^i} - \sum_{i=0}^n \frac{UW_{j_i}}{(1+z)^i}} \quad (3.14)$$

2. Dynamischer Vermeidungskostenansatz unter Berücksichtigung der Umweltwirkungen *ohne* Abdiskontierung auf das Basisjahr.

$$VK_{\text{dynamisch } j} = \frac{BW_j - BW_{\text{Referenz}}}{\sum_{i=0}^n UW_{\text{Referenz}_i} - \sum_{i=0}^n UW_{j_i}} \quad (3.15)$$

$BW_j$	Barwert der Vergleichstechnologie j
$BW_{\text{Referenz}}$	Barwert der Referenztechnologie
$UW_{\text{Referenz}_i}$	Umweltwirkung der Referenztechnologie im Jahre i
$UW_{j_i}$	Umweltwirkung der Vergleichstechnologie j im Jahre i

### Statischer Vermeidungskostenansatz

Beim statischen Vermeidungskostenansatz werden die Vermeidungskosten (VK) unter Berücksichtigung aller Auszahlungen und Einnahmen ( $GK_{\text{statisch}}$ ) und aller zu untersuchenden Umweltwirkungen über die gemeinsame Lebensdauer (UW) ermittelt:

$$VK_{\text{statisch } j} = \frac{GK_j - GK_{\text{Referenz}}}{\sum_{i=0}^n UW_{\text{Referenz}_i} - \sum_{i=0}^n UW_{j_i}} \quad (3.16)$$

$GK_{\text{Referenz}}$	Gesamtkosten der Referenztechnologie über die Lebensdauer
$GK_j$	Gesamtkosten der Vergleichstechnologie j über die Lebensdauer

### 3.2.2 Bewertung der Vermeidungskosten und Wahl des Vermeidungskostenansatzes

Die Umweltbewertung gibt Auskunft zu den absoluten Umweltwirkungen und der Minderung oder der Zunahme einer Umweltwirkung gegenüber der Referenz. Aus der Kostenbilanz werden die absoluten Kosten und die Mehr- oder Minderkosten zur Referenz berechnet. Werden aus diesen Ergebnissen die Vermeidungskosten ermittelt, ist zu beachten, dass nur die Ergebnisse bewertet werden können, die im Vergleich zu einer Referenz eine geringere – im Sinne von „vermiedene“ – Umweltwirkung aufweisen. Sofern dann die im Vergleich zur Referenztechnologie zu bewertende „Technologie A“ höhere Vermeidungskosten als die zu bewertende

„Technologie B“ besitzt, kann aus Sicht des Vermeidungskostenansatzes die günstigere „Technologie B“ bevorzugt werden.

Die Darstellung in Abb. 3-2 verdeutlicht noch einmal, dass die Minderung der Umweltbelastung höher eingeschätzt wird, als die Minderung der Kosten. Eindeutig positiv fällt daher die Bewertung aus, falls sich für eine Technologie im Vergleich zur Referenz gleichfalls niedrigere Kosten und geringere Umweltwirkungen ergeben (doppelter Nutzen). Die abschließende Bewertung kann in einigen Fällen problematisch sein, sofern z.B. mit der Verwendung der Technologie anfangs noch ein einfacher Schaden verbunden wäre, der jedoch perspektivisch ausgeräumt werden könnte.

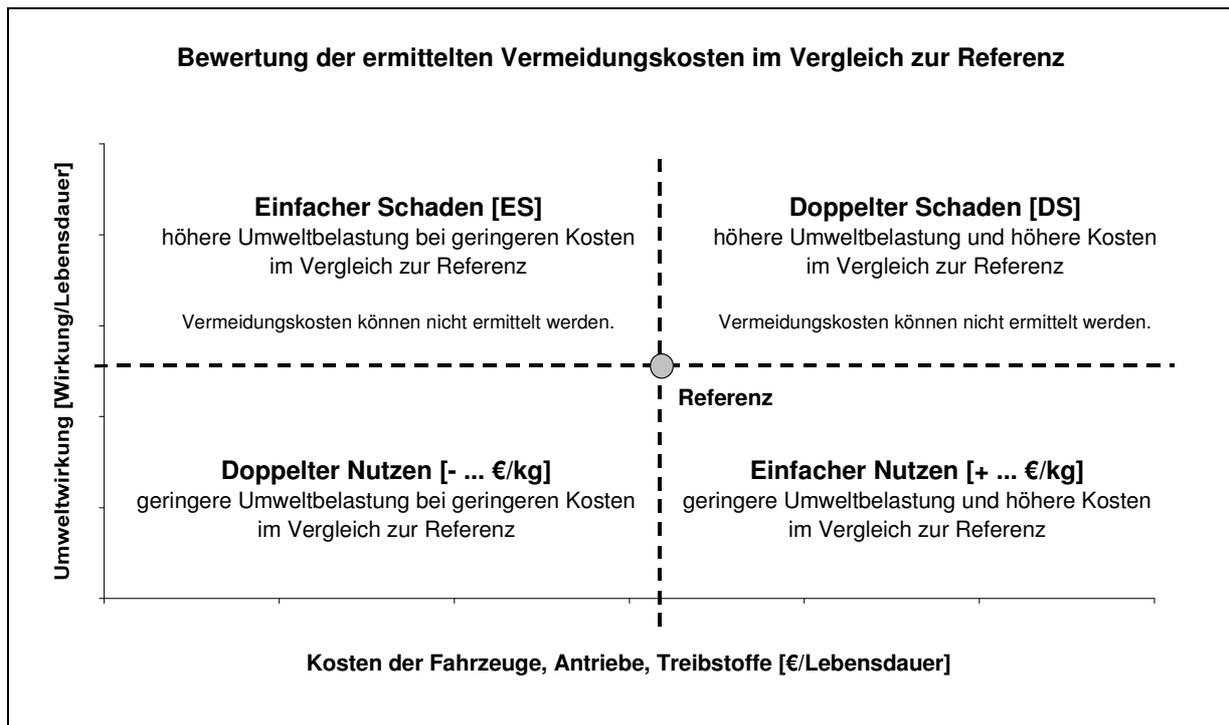


Abb. 3-2: Bewertung der ermittelten Vermeidungskosten im Vergleich zur Referenz

#### Bewertungsrahmen der Kosten-Nutzen-Analyse

Kosten-Nutzen-Analysen können nur dann vorgenommen werden, falls gemäß Abb. 3-2 ein Nutzen zu bilanzieren ist. Dafür sollen zunächst die Umweltbilanzergebnisse zusammengefasst und bewertet werden, um im Fall von Vorteilen der zu untersuchenden Technologie gegenüber der Referenz anschließend auf Basis der getrennt erhobenen Kostenbilanzdaten eine Bewertung und erst dann die Kosten-Nutzen-Analyse zu erstellen.

Bei den Kosten ist es besonders wichtig, dass der Untersuchungszeitraum für alle Technologien zu einem identischen Zeitpunkt beginnt und den gleichen Zeithorizont berücksichtigt. Neue Technologien sollen ausschließlich für einen in der Zukunft liegenden Zeitpunkt und unter Berücksichtigung von Kostenzielen bilanziert werden, da heutige Prototypkosten wenig aussagefähig sind. Das heißt daher, dass auch für heutige Technologien das Zukunftspotential geschätzt werden muss.

Um den Aufwand der Kosten-Nutzen-Analyse mit einem vertretbaren Niveau zu gestalten, sollen die Ziele des Kostenvergleiches so definiert werden, dass die Ermittlung der Kostenpositionen weitgehend nachvollziehbar bleibt. Im Ergebnis sollen dann nur die Kostenpositionen untersucht werden, die sich auch tatsächlich voneinander unterscheiden. Einige Beispiele können dies verdeutlichen.

- I. Wird unter Berücksichtigung der **gleichen Antriebstechnik** (z.B. Dieselmotor) nur ein **Wechsel des Treibstoffes** untersucht (z.B. Diesel und RME unter Vernachlässigung des zusätzlichen motortechnischen Aufwandes), so ist die Verknüpfung von Verbrauch und Treibstoffkosten ausreichend.
- II. Wird für einen **gleichbleibenden Treibstoff** ein **Wechsel des Antriebes** untersucht (z.B. Ottomotor, Ottomotor mit elektromechanischen Ventiltrieben), so sind nur noch die Kosten der Antriebe, der veränderte Verbrauch und die Kosten des Treibstoffes zu berücksichtigen.
- III. Nur sofern **Antrieb und Treibstoff** bei den zu vergleichenden Technologien wechseln oder **karosserietechnische Maßnahmen** erforderlich sind und mit antriebsseitigen Maßnahmen verglichen werden (z.B. Leichtbau zur Gewichtsreduktion der schwerer dimensionierten Fahrwerksauslegung von Elektrofahrzeugen, Vergleich der Verbrauchsminderungen durch Motortechnik und Leichtbau), ist eine umfassende Bilanz der sich unterscheidenden Kostenpositionen zu erstellen.

Die Referenz kann sich auf einen Zeitpunkt in der Gegenwart beziehen. Sofern auch Fortentwicklungen dieser Referenztechnologie untersucht werden sollen, so gelten gleichermaßen die Forderungen an den zukünftigen Untersuchungshorizont und die Zielkosten neuer Technologien.

Werden Nischenprodukte untersucht (z.B. Nullemissionsfahrzeuge für geschlossene Räume), die klare Umweltvorteile in konkreten Anwendungsgebieten haben können, so empfiehlt es sich, eine gesonderte Bewertung vorzunehmen, in der gezielt Bewertungsschwerpunkte gesetzt werden.

#### Wahl des Vermeidungskostenansatzes und des Bewertungsrahmens

Das Ziel dieser Arbeit soll darin bestehen, dass alle Basisdaten und die daraus resultierenden Ergebnisse immer einfach überprüfbar bleiben. Dies gilt besonders für die Kosten neuer Technologien, die in Fachkreisen teilweise kontrovers diskutiert werden. Die statische Investitionsrechnung bietet sich an, da die Kostenstrukturen und Datengrundlagen immer nachvollziehbar bleiben. Dies gilt auch für die Berechnung der Umweltwirkungen. Die Kosten werden auf die identische Nutzungsdauer der Fahrzeuge bezogen und ins Verhältnis zu dem umweltrelevanten Nutzen über die gleiche Dauer gesetzt, um das Kosten-Nutzen-Verhältnis zu berechnen. Die Bewertung erfolgt für ein gegenwärtiges Referenzfahrzeug, das den Fortentwicklungen dieser Referenztechnologie und weiteren neuartigen Technologien vor einem gemeinsamen zukünftigen Untersuchungshorizont und unter Berücksichtigung von Zielkosten der neuer Technologien gegenübergestellt wird. Die Beschreibung des neu entwickelten Modells und der Datengrundlagen findet sich im folgenden Kapitel 4.



## 4 Modellentwicklung und Modellergebnisse

Für die Ermittlung der Umweltwirkungen und der Kosten neuer Antriebe wird in dieser Arbeit ein Modell entwickelt, in dem umfassende Datengrundlagen erhoben, verifiziert und bewertet werden. Die Verknüpfung der entwickelten Modellteile veranschaulicht Tab. 4-1. Zunächst werden die Details der konzeptionellen Auswahl (Fahrzeugtyp, Treibstoffe, Fahrzyklen) in Kapitel 4.1 beschrieben, um in Kapitel 4.2 die für diese Arbeit entwickelten Modellteile zu erläutern. Die umwelt- und kostenbezogenen Eingangsdaten werden in den folgenden Kapiteln 4.3 und 4.4 dargestellt. In den Kapiteln 4.5 bis 4.8 werden die Modellergebnisse zusammengefasst und diskutiert.

Tab. 4-1: Modellteile und Ergebnisse der Ermittlung von Kosten-Nutzen-Verhältnissen

Modellteil	Modelltyp
• Treibstoffkosten	Kosten
• Auslegung und Kosten (einschl. Ergebnisse zu Treibstoffkosten)	Kosten/Verbrauch
• Herstellungsbilanz	Umwelt
• Umweltbilanz (einschl. Ergebnisse zur Herstellungsbilanz und zum Verbrauch)	Umwelt
• Vermeidungskosten (Zusammenführung aller Ergebnisse)	Kosten/Nutzen
Endergebnisdaten	
• Vermeidungskosten Referenz-Pkw (Umweltbilanz: Betrieb)	
• Vermeidungskosten Referenz-Pkw (Umweltbilanz: Betrieb+Herstellung)	
• Grafiken aller umweltrelevanten Wirkungskategorien	
• Vermeidungskosten unter Berücksichtigung einer Annuität	
• Vermeidungskosten mit wechselnder Referenz (3-Liter-Auto-Referenz)	

### 4.1 Randbedingungen der Modellentwicklung

In den folgenden Kapiteln wird zunächst die Auswahl der Fahrzeugkategorie, der Antriebsvarianten und der Fahrzyklen erläutert. Weitere Konkretisierungen hinsichtlich der Eigenschaften der untersuchten Antriebe finden sich in Kapitel 4.3.3.1.

#### 4.1.1 Fahrzeugkategorie und Referenz

In der Regel werden bei der Untersuchung neuer Antriebsvarianten – nicht zuletzt wegen der höchsten Zulassungszahlen im motorisierten Verkehr – ausschließlich **Personenkraftwagen** herangezogen. Bei der Überprüfung des in dieser Arbeit entwickelten Untersuchungsverfahrens wird der Schwerpunkt der Bewertungen daher auf dieser Kategorie liegen. Untersuchungen anderer Fahrzeugkategorien sind mit dem entwickelten Modell jedoch ebenfalls möglich.

Untersuchungen des Umweltbundesamtes für zukünftige Fahrzeugkonzepte bei Pkw legen den Schwerpunkt auf Vergleiche und Untersuchungen von Fahrzeugen der **Kleinwagenklasse**. Das **Referenzfahrzeug 2003** ist daher ein typischer mit einem Ottomotor ausgestatteter Pkw dieser Kategorie, der im Verbrauch und bei den Abgasemissionen dem gegenwärtigen Stand der Technik entspricht. Systemübergreifende Eigenschaften sind in Tab. 4-2 zusammengefasst. Die Antriebsleistungen der Pkw liegen zwischen 40 und 50 kW.

Grundlage für die weiteren ökologisch vertretbaren **Pkw der Kleinwagenklasse im Jahr 2010** ist die Definition eines so genannten ökologisch vertretbaren Automobils, das in einem Beschluss der 50. Umweltministerkonferenz gefordert wurde [264]. Dabei soll es sich um ein familientaugliches Fahrzeug handeln, das mit der bestmöglich verfügbaren Technik zur Minderung der Umweltbelastungen ausgestattet ist, ohne Einbußen an Sicherheit und Komfort. Die Mindestanforderungen an die durchschnittlichen **CO<sub>2</sub>-Emission** im Benzin und Dieselbetrieb sollen bei 120 gCO<sub>2</sub>/km bis zum Jahr 2004 liegen und soll langfristig auf 90 gCO<sub>2</sub>/km gesenkt werden (vgl. Tab. 7-7, Anhang). Systemübergreifende Eigenschaften der untersuchten Fahrzeuge werden in Tab. 4-2 der Referenz gegenübergestellt.

Tab. 4-2: Systemübergreifende Eigenschaften der untersuchten Pkw

Kenngrößen		Kleinwagenklasse Pkw	
		Referenz-Pkw	Zukünftiger Pkw
Transportkapazität	Personen	5	5
Zuladung	kg	400	400
Leergewicht ohne Antrieb, Speicher	kg	720	410
Reichweite	km	750	600 <sup>1)</sup>
Höchstgeschwindigkeit	km/h	160	160
Beschleunigung 0-100 km/h	s	17	18
Luftwiderstandsbeiwert, c <sub>w</sub>	-	0,3	0,25
Querschnittsfläche, A	m <sup>2</sup>	2,00	2,00
c <sub>w</sub> x A	m <sup>2</sup>	0,6	0,5
Rollwiderstandsbeiwert, f <sub>r</sub>	-	0,01	0,007

<sup>1)</sup> Batterieelektrische Fahrzeuge sind mit einer Reichweite von max. 100 km ausgelegt.

#### 4.1.2 Verwendete Treibstoffe

Neben den direkten Umweltwirkungen, die durch die Fahrzeuge verursacht werden, sind die verwendeten Treibstoffe, deren Primärenergiebasis und die Herstellungsverfahren für die Umweltwirkung der Treibstoffe verantwortlich. Neben den Kraftstoffen Benzin und Diesel werden neun weitere Treibstoffe unter Berücksichtigung unterschiedlicher Herstellungsverfahren hinsichtlich ihrer Umweltwirkung bei der Nutzung im Pkw untersucht (Tab. 4-3). Eine Beschreibung der untersuchten Prozesse der Treibstoffherstellung findet sich in Kapitel 4.3.1.

Tab. 4-3: Treibstoffvarianten

<b>Treibstoffvarianten</b>	
(1.)	Ottokraftstoff
(2.)	Diesekraftstoff
(3.)	komprimiertes Erdgas
(4.)	Flüssigerdgas
(5.)	komprimierter Wasserstoff aus Erdgas mit a) zentraler Erdgasreformierung und b) dezentraler Erdgasreformierung
(6.)	Flüssigwasserstoff aus a) Erdgas (zentrale Reformierung) b) Elektrolyse, Strom aus erneuerbarer Energie (Wind, Wasser)
(7.)	Methanol aus a) Erdgas (zentrale Erdgassynthese) b) Biomasse
(8.)	Dimethylether aus Erdgas
(9.)	Ethanol aus biogenen Quellen
(10.)	Rapsölmethylester
(11.)	Strom, öffentliches Netz der Energieversorgungsunternehmen (Niederspannung)

### 4.1.3 Antriebsvarianten

Die Summe der untersuchten Antriebsvarianten ist abhängig von der Variantenvielfalt der Antriebe, der Abgasstandards und der nutzbaren Treibstoffe. In [Tab. 4-4](#) sind die untersuchten Antriebsvarianten zusammengefasst.

Tab. 4-4: Antriebsvarianten

<b>Referenzfahrzeuge mit Ottomotor und Varianten der Antriebe und Komponenten</b>	<b>Zu den Antrieben zugehörige Treibstoffe</b>
- Referenz Ottomotor	- Ottokraftstoff
- Benzin-Direkteinspritzung	- Ottokraftstoff
- Ottomotor, elektromechanischer Ventiltrieb	- Ottokraftstoff
- Referenz + Leichtlaufreifen	- Ottokraftstoff
- Referenz + Leichtlauföle	- Ottokraftstoff
<b>Leichtbaufahrzeuge und neuartige Antriebe und deren Modifikationen</b>	<b>Zu den Antrieben zugehörige Treibstoffe</b>
- Benzin-Direkteinspritzung	- Ottokraftstoff
- Ottomotor	- Ottokraftstoff, Erdgas, Wasserstoff, Methanol, Ethanol
- Dieselmotor	- Diesekraftstoff, Dimethylether, Rapsölmethylester
- Hybridantriebe	- Ottokraftstoff, Diesekraftstoff, Methanol
- Brennstoffzelle	- Wasserstoff
- Brennstoffzelle + Reformier	- Wasserstoff, Methanol
- Methanolf Brennstoffzelle	- Methanol
- Elektroantrieb	- Strom

Dabei ist zu berücksichtigen, dass in angepassten Dieselmotoren neben Diesekraftstoff auch Rapsölmethylester und Dimethylether verwendet werden kann und in angepassten Ottomotoren auch Erdgas, Wasserstoff, Methanol und Ethanol eingesetzt werden kann. Daneben wird in

Brennstoffzellen Methanol und Wasserstoff eingesetzt und in batterieelektrischen Pkw elektrischer Strom. Die weiteren Eigenschaften der Antriebe werden Kapitel 4.3.3.1 zusammengefasst.

Ergänzend werden unterschiedliche aktuelle und zukünftige Abgasmindeststandards untersucht (Tab. 4-5). Während alle Fahrzeuge mindestens den Standard EURO 4 erfüllen, werden auch weitere Grenzwertverschärfungen untersucht. Weitere Details zu den Grenzwertanforderungen finden sich in Kapitel 4.3.3.5.

Tab. 4-5: Abgasmindeststandards

Abgasmindeststandards	
- EURO 4 (Benzin)	- SULEV <sup>2)</sup>
- EURO 4 (Diesel)	- SULEV <sup>2)</sup> (Ausnahme NO <sub>x</sub> )
- EURO 5 <sup>1)</sup> (Diesel, kraftstoffneutral)	- ZEV

<sup>1)</sup> EURO 5 nach Grenzwertvorschlag gemäß Tab. 4-12

<sup>2)</sup> SULEV, Super Ultra Low Emission Vehicle

#### 4.1.4 Verwendete Fahrzyklen

Um eine normierte Vergleichsbasis zur Beurteilung der Pkw-Emissionen und der Verbrauchsdaten zu erhalten, beziehen sich alle Angaben auf den

- neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ, Abb. 7-8, Anhang).

Um spätere Modellrechnungen zu ermöglichen, die repräsentative Realzyklen abbilden, werden nach der Methodik im Handbuch für Emissionsfaktoren [137], weitere Verbrauchs- und Emissionsangaben modelliert:

- Innerorts (IO)
- Außerorts (AO)
- Autobahn (AB)

Vergleichbare Modellrechnungen wurden in [123], [124], [127], [186] erstellt. Die Zyklenwerte bestehen aus gewichtet zusammengesetzten Einzelzyklenwerten, wie sie im Handbuch für Emissionsfaktoren zusammengefasst sind. Sie eignen sich daher nicht zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauches von zukünftigen Pkw auf der Basis von Modellrechnungen. In der Weiterentwicklung der Methodik für das Handbuch für Emissionsfaktoren werden gegenwärtig in der internationalen Arbeitsgruppe ARTEMIS neue Fahrzyklen und deren Anwendbarkeit untersucht [42]. Dabei werden nicht mehr die Einzelergebnisse aus verschiedenen berechneten Fahrsituationen miteinander gewichtet und addiert wie in [137], sondern es wird ein repräsentativer Fahrzyklus gefahren. Der in [42] dargestellte HYZEM-Fahrzyklus besteht ebenfalls aus den genannten Teilen IO, AO, AB (Abb. 7-9, Anhang). Die Grundlagen für die Ermittlung des mechanischen Energiebedarfs für die Zyklen werden aus [77] abgeleitet und sind im Anhang in Abb. 7-10 bis Abb. 7-12 dargestellt. Die Ermittlung der Emissionen und Verbräuche einer für das Jahr 2010 repräsentativen durchschnittlichen Fahrleistungsverteilung kann auf Grundlage

einer durchschnittlichen Gewichtung mit 30% IO, 40% AO und 30% AB berücksichtigt werden [127].

## 4.2 Modellbeschreibung

In dieser Arbeit wurde ein Bewertungsmodell entwickelt. Die Modellierung des Bewertungsverfahrens erfolgt auf der Basis von MS Excel-Kalkulationstabellen, mit denen alle Modellteile der Kosten-Nutzen-Rechnung abgedeckt werden.

### Auslegung und Kosten

Der zentrale Modellteil für die Modellierung der Pkw wird als „Auslegung und Kosten“ bezeichnet und beinhaltet Daten zur Auslegung von Pkw der Kleinwagenklasse mit unterschiedlichen Antrieben. Auf der Basis von Daten für Bauteile und Bauteilgruppen zu den Massen und deren Herstellungskosten werden der Pkw-Verbrauch und die Gesamtkosten modelliert.

Zunächst werden die Massen der Fahrzeuge und Antriebe von insgesamt 31 unterschiedlichen Fahrzeugantriebsvarianten der Kleinwagenklasse (Polo-Klasse) ermittelt. Ein Fahrzeug mit Ottomotor wird als Referenz-Pkw definiert, auf dessen Basis fahrzeug- und motortechnische Optimierungen (z.B. Leichtlauföl, Leichtölaufreifen, Benzin-Direkteinspritzung der ersten Generation) modelliert werden. Zukünftige Antriebsvarianten, hierzu gehören auch fortschrittliche Otto- und Dieselmotoren, sowie neue Treibstoffe, werden mit einer Leichtbaukarosserie modelliert. Auslegungskriterien bilden Literaturdaten zu Leistung, Gesamtmasse, Antriebsmasse und Wirkungsgrad im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), aus denen weitere Fahrzeugvarianten abgeleitet werden. In Kombination mit den spezifischen Bauteildaten der Fahrzeuge und der Antriebe wird im Modell der theoretische Energiebedarf der Antriebe errechnet. Unter Anwendung durchschnittlicher Antriebswirkungsgrade im NEFZ wird der Kraftstoffverbrauch berechnet. Daraus wird das Speichergewicht des Referenz-Pkw für eine Reichweite von 750 km ermittelt. Dies entspricht etwa den gegenwärtigen Reichweiten heutiger Pkw. Wegen des Einsatzgebietes von Pkw der Kleinwagenklasse und der Anforderungen eines konsequenten Leichtbaus wurde die Mindestreichweite des Leichtbau-Pkw auf 600 km reduziert. Aus den bauteil- und bauteilgruppenspezifischen Teilergebnissen wird daraus im Modell das Gesamtgewicht des Fahrzeuges, mit einer ergänzenden Anpassung der Fahrwerksgewichte in Abhängigkeit von den Speicher- und Antriebsgewichten, abgeleitet. Dieser Prozess der Verbrauchsberechnung unter Berücksichtigung der angepassten Speichergewichte wird iterativ wiederholt, bis die Differenz zwischen den einzelnen Verbrauchsberechnungen ausreichend klein ist. Neben dem für die Auslegung relevanten NEFZ werden ergänzend Verbrauchswerte für die Fahrzyklen Innerorts (IO), Außerorts (AO) und Autobahn (AB) berechnet, um Basisemissionsfaktoren für ergänzende Modellierungen von Szenarienrechnungen bereitzustellen.

Ergänzend zu den für die Ermittlung der Fahrzeugmasse notwendigen detaillierten Bauteilmassen zur Berechnung der Verbrauchswerte, beinhaltet das Modell Kostendaten. Die Kosten werden auf Grundlage von Herstellungskosten modelliert. Diese Daten werden zunächst für die Komponenten des Antriebsstrangs, bestehend aus den Bauteilgruppen Antrieb, Getriebe, Speicher und Abgassystem, bauteilspezifisch oder bauteilgruppenspezifisch abgelegt. Aus

diesen spezifischen Werten für den jeweiligen Antriebsstrang und ergänzenden übergreifend zusammengefassten Kosten für die gesamte Fahrzeugkarosserie werden die Gesamtkosten für alle Fahrzeugvarianten modelliert. Bei den in der Entwicklung befindlichen zukünftigen Konzepten handelt es sich um angestrebte Zielwerte für die Kosten in der Serienfertigung, die sich häufig auch an den Kosten konkurrierender Systeme orientieren. Innerhalb des Modells wird die Herkunft aller Eingangsdaten dokumentiert. In der Regel wird die Auswahl der verwendeten gewichtsbezogenen Werte und Kosten abgegrenzt und gegenüber ergänzenden Datenquellen begründet. Dadurch ist eine Verifikation aller Basisdaten innerhalb des Modells gewährleistet. Ergänzend werden auch die Kosten zukünftiger Grenzwertstufen (EURO 5, SULEV) angegeben. Weitere Erläuterungen hierzu finden sich im Modellteil „Umweltbilanz“.

#### Treibstoffkosten

Der Teilbeitrag „Treibstoffkosten“ beinhaltet die Kosten aller verwendeten Treibstoffe. Dafür werden verfügbare Kostendaten für Treibstoffe analysiert. Eine begründete und aus der umfassenden Analyse abgeleitete Datentabelle dient als Datengrundlage für den oben beschriebenen Modellteil „Auslegung und Kosten“.

#### Herstellungsbilanz

Im Modellteil „Herstellungsbilanz“ werden vorhandene bauteil- und bauteilgruppenspezifische Energie- und Emissionsbilanzen der Herstellung zusammengeführt. Es werden Gesamtbilanzen für die Herstellung der untersuchten Pkw modelliert und berechnet.

Nach den Randbedingungen im Modellteil „Auslegung und Kosten“ werden Sachbilanzen für 31 Fahrzeugvarianten berechnet. Grundlage bilden vorhandene Bilanzdaten für unterschiedliche Bauteile und Bauteilgruppen, die aus dem Modell Gabi 3.0-UBA [134] und für Brennstoffzellenantriebe aus [193] übernommen werden. Die Sachbilanzdaten der Herstellung werden zusammengefasst und mit Äquivalenzfaktoren (z.B. CO<sub>2</sub>-Äquivalente, Versauerungsäquivalente) für 11 Wirkungskategorien (vgl. [Tab. 4-17](#)) in Wirkungsbilanzen überführt. Diese Ergebnisse werden dann in den folgenden Modellteil „Umweltbilanz“ übertragen.

#### Umweltbilanz

Im Modellteil zur Ermittlung der „Umweltbilanz“ werden alle umweltbezogenen Sachbilanzdaten modelliert, aus anderen Modellteilen übertragen und miteinander verknüpft. Dabei handelt es sich um die Abgasemissionen der Pkw, die Emissionen der Treibstoffherstellung, die Emissionen aus den treibstoffspezifischen Bestandteilen und die Emissionen der Fahrzeugherstellung. Aus den Sachbilanzdaten werden über Äquivalenzfaktoren für die Wirkungskategorien die Wirkungsindikatoren berechnet.

Die limitierten und nicht-limitierten Abgasemissionen der unterschiedlichen Fahrzeugmodelle werden für den Fahrbetrieb bilanziert. Dabei wird zwischen fünf Grenzwertstufen unterschieden. Für Konzepte die auf Benzinmotoren basieren, gilt der Grenzwert EURO 4 (Benzin) als Mindestanforderung. Für Konzepte, die auf Dieselmotoren basieren, bildet der Grenzwert EURO 4 (Diesel) das mindestens zu erreichende Abgasniveau für die Vergleiche. Für diese Varianten wird ergänzend jeweils eine weiterführende Grenzwertstufe, EURO 5 (Diesel) und SULEV (Benzin), hinsichtlich der Emissionen bilanziert. Eine Ausnahme bildet der Wasser-

stoffverbrennungsmotor wegen hoher Stickstoffoxidemissionen [94]. Um auf eine aufwändige Abgasnachbehandlung zu verzichten, wird für dieses Fahrzeug eine Ausnahme berücksichtigt (SULEV+NO<sub>x</sub>). Fahrzeuge mit Brennstoffzellen im Wasserstoffbetrieb und das batteriebetriebene Elektrofahrzeug werden als Nullemissionsfahrzeug (ZEV) bilanziert. Die mit der Abgasreinigung verbundenen Kosten werden modelliert, sind umfassend begründet und werden im Modell „Auslegung und Kosten“ abgelegt.

Wie bei der Modellierung der Verbrauchswerte bildet bei den Abgasemission der NEFZ die Basis. Die Bilanzdaten basieren auf vorliegenden Messungen im NEFZ. Sofern keine Werte im NEFZ vorliegen, werden aus Vergleichsmessungen zwischen Pkw mit Benzinantrieb und alternativem Antrieb (z.B. Methanol, Ethanol) in US-Zyklen Minderungsfaktoren abgeleitet und auf den NEFZ übertragen. In Ausnahmefällen, besonders bei Brennstoffzellenantrieben mit Reformier oder Direktmethanolbrennstoffzellen, zu denen keine Messungen vorliegen, werden plausible Minderungsfaktoren geschätzt. Innerhalb des Modells wird die Herkunft aller Eingangsdaten dokumentiert. Darüber hinaus werden im Modell auf Grundlage des Handbuchs für Emissionsfaktoren [137] und ergänzender Minderungsfaktoren, die aus dem NEFZ abgeleitet werden, die Emissionen in den Fahrzyklen IO, AO, AB berechnet.

Neben den Abgasemissionen treten auch Emissionen auf, die vom Treibstoffverbrauch und den treibstoffspezifischen Eigenschaften (C-Gehalt, S-Gehalt) abhängen. Die davon abhängigen direkten CO<sub>2</sub>- und SO<sub>2</sub>-Emissionen werden deshalb aus dem modellierten Treibstoffverbrauch im Modellteil „Auslegung und Kosten“ in diesen Modellteil übertragen und über eine Datentabelle mit den relevanten Stoffwerten errechnet.

Für die Berechnungen der Emissionen der Treibstoffherstellung beinhaltet dieser Modellteil die Sachbilanzdaten von 11 unterschiedlichen Treibstoffen und 14 Herstellungsverfahren.

Auf Grundlage der Modelldaten zu den Fahrzeugverbrauchswerten, den direkten Fahrzeugemissionen und den Bilanzdaten der Treibstoffherstellung werden Sachbilanzen berechnet, die mit Hilfe einer Datentabelle mit Äquivalenzfaktoren für unterschiedliche Wirkungskategorien in Wirkungsindikatoren überführt werden. Die Wirkungsbilanzen aus den Abgasemissionen der Pkw, den Emissionen der Treibstoffbereitstellung und den Verbrauchswerten des Fahrzeugbetriebes werden ergänzend mit den Ergebnissen der Wirkungsbilanzen der Fahrzeugherstellung aus dem Modellteil „Herstellung“ verknüpft.

#### Vermeidungskosten

Bei der Kosten-Nutzen-Analyse werden die Vermeidungskosten ermittelt. Dies ist der Quotient aus Kosten und (Umwelt-)Nutzen im Vergleich zu einer Referenz. Im Modellteil „Vermeidungskosten“ werden daher die Daten der Kostenbilanzen und der umweltbezogenen Wirkungsbilanzen zusammengeführt.

Aus den ermittelten Kostengrößen im Modellbeitrag „Auslegung und Kosten“ und den Wirkungsindikatoren im Modellbeitrag „Umweltbilanz“ werden die Vermeidungskosten im Vergleich zu einem Referenz-Pkw berechnet. Grundlage der Berechnung bildet der statische Vermeidungskostenansatz (Kapitel 3.2). Ein heutiger Pkw der Grenzwertstufe EURO 4 mit Ottomo-

tor bildet die Referenz. Nur falls die vermiedenen Umweltwirkungen massenbezogen ermittelt werden, können Vermeidungskosten berechnet werden. In den Wirkungskategorien, für die nur relative Wirkungen berechnet werden (z.B. direkte Humantoxizität, Kanzerogenität), können keine Kosten-Nutzen-Verhältnisse ermittelt werden. Ergänzend beinhaltet das Modell auch die Ergebnisse unter Berücksichtigung des dynamischen Vermeidungskostenansatzes.

Da die Daten in allen Modellteilen für alle Fahrzeugvarianten und auf allen Aggregationsebenen immer eine gemeinsame Bezugsgröße besitzen, können die Modelldaten der Antriebe ohne Aufwand miteinander verglichen und ergänzende Aussagen abgeleitet werden.

### 4.3 Ermittlung und Verknüpfung der umweltbezogenen Modelldaten

Die Umweltwirkungen heutiger Kfz sind maßgeblich durch deren Nutzungsphase bestimmt. Neben einer umfassenden Auswertung der in der Literatur veröffentlichten Daten zur Herstellung verschiedener Treibstoffe (Kapitel 4.3.1) und der Berücksichtigung treibstoffspezifischer Emissionen (Kapitel 4.3.2) werden Modellrechnungen, vergleichende Bewertungen und Literaturrecherchen für die unterschiedlichen Antriebskonzepte durchgeführt, in denen das Fahrzeuggewicht, der daraus resultierende Kraftstoffverbrauch und die Abgasemissionen in verschiedenen Fahrzuständen bilanziert werden (Kapitel 4.3.3).

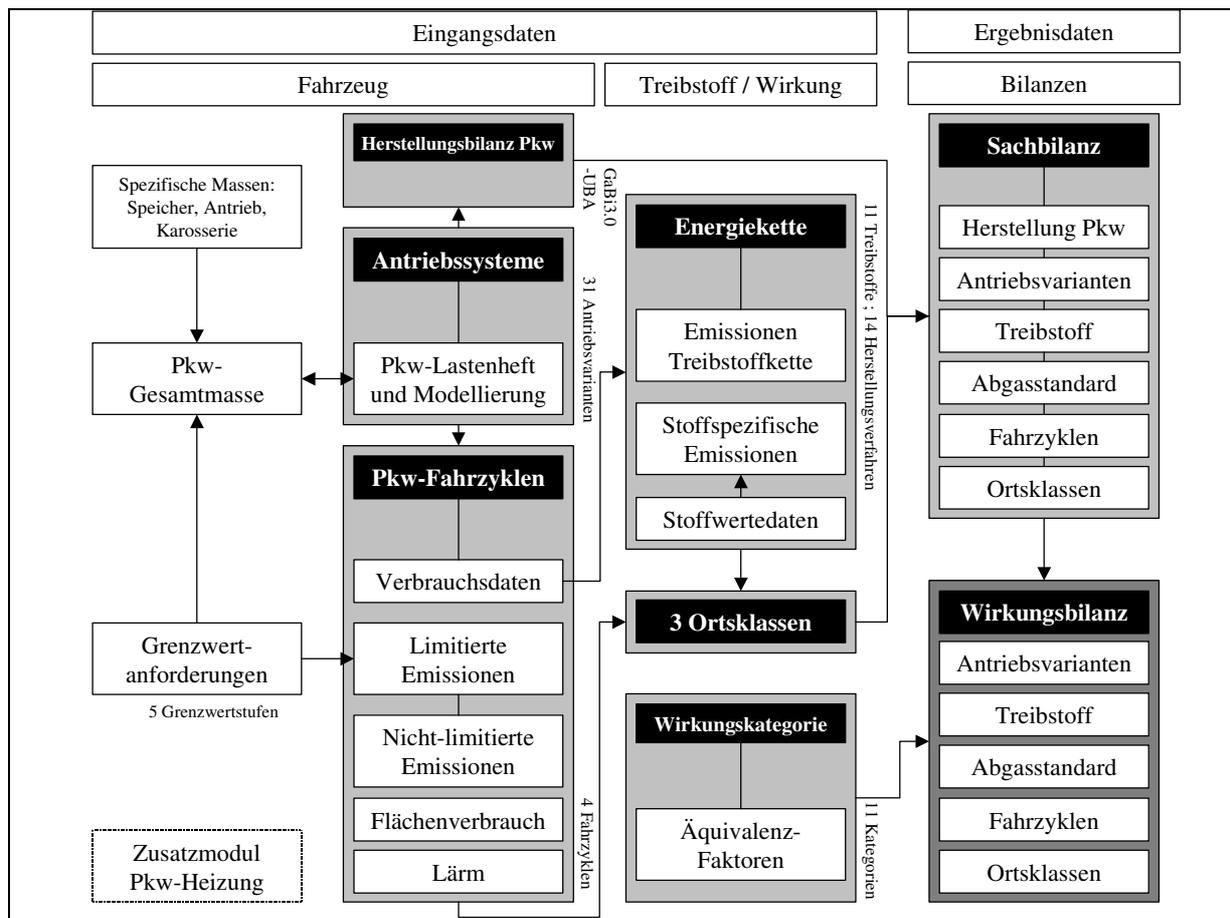


Abb. 4-1: Modellierung der Umweltwirkungen

Anders als für die Emissionen der Nutzungsphase basiert die Erhebung der Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung auf vorhandenen Sachbilanzdaten für Bauteile und Bauteilgruppen ([134], [193]). Wegen der großen Zahl von Einzelteilen mit z.T. komplexer Zusammensetzung orientiert sich diese Arbeit an typischen Pkw-Modellen und den daraus abgeleiteten Varianten (Kapitel 4.3.4).

Die Methodik hinsichtlich der Verknüpfung der Modelldaten ist in Abb. 4-1 zusammengefasst. Die Endergebnisse der Berechnung der Umweltwirkung beziehen sich auf wirkungsbezogene Bilanzen, deren Systematik in den Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.10 beschrieben ist. Die Ergebnisse der Wirkungsbilanz aus Abb. 4-1 dienen gleichzeitig als Eingangsdaten für die in Kapitel 4.5 beschriebenen Arbeiten zur Ermittlung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses.

### 4.3.1 Umwandlungsketten der Treibstoffherstellung

Die Umweltwirkungen der Treibstoffe hängen maßgeblich von den verwendeten Primärenergieträgern, den notwendigen Herstellungsverfahren und deren Aufbereitung hinsichtlich ihrer Speicherung im Fahrzeug ab. Die wesentlichen Verfahrensschritte bei der Modellierung der Umwandlungsketten sind vereinfacht in Abb. 4-2 dargestellt.

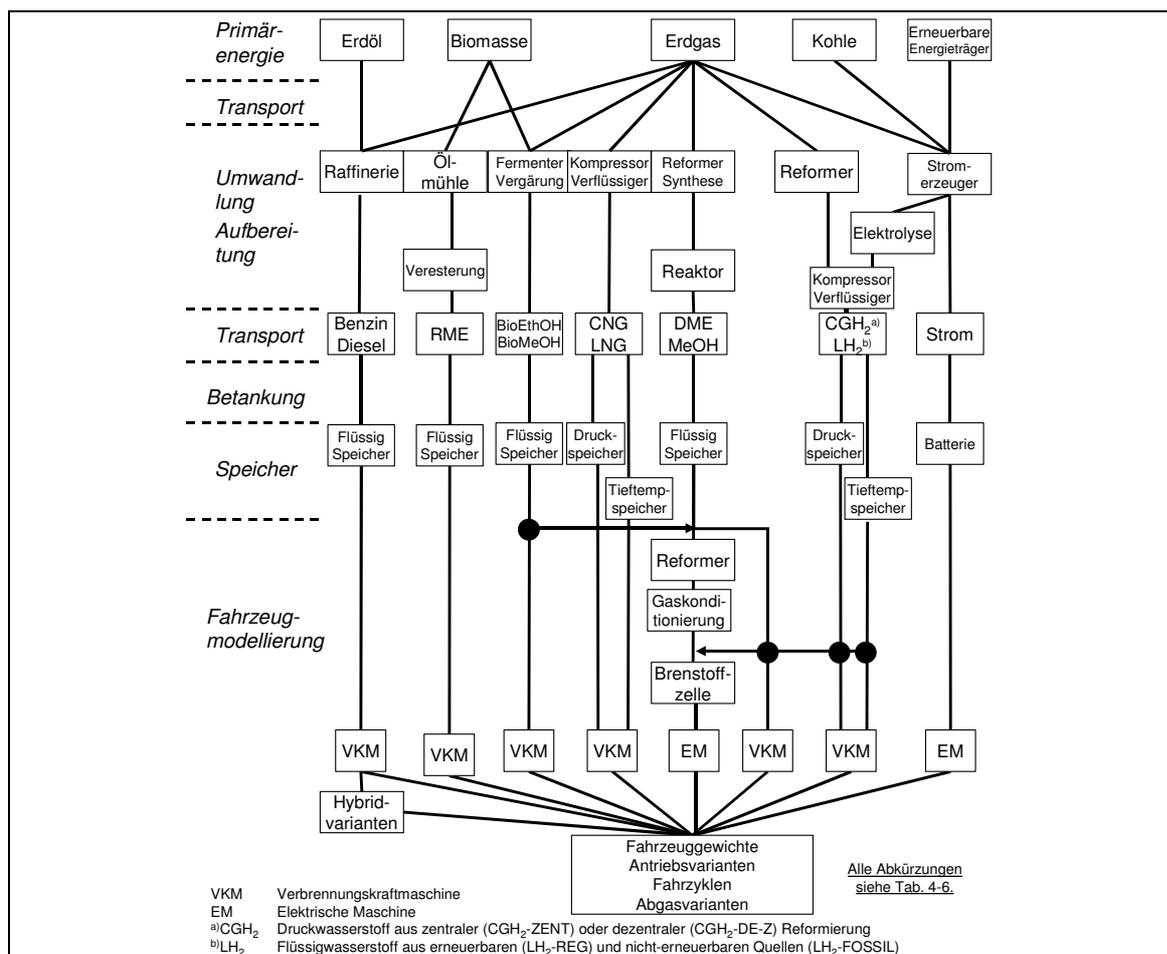


Abb. 4-2: Vereinfachte Darstellung der Modellierung der Umwandlungsketten

### 4.3.1.1 Erforderliche Prozesse

In einer umfassenden Literaturstudie werden die unterschiedlichen veröffentlichten Daten für die in Abb. 4-2 dargestellten Prozesse gegenübergestellt, geprüft und bewertet. Eine Zusammenfassung aller Datentabellen des Anhangs (Tab. 7-8 bis Tab. 7-29) findet sich in der folgenden Tab. 4-6. Es werden auch die wesentlichen Herstellungsprozesse und deren Eigenschaften beschrieben. Der Referenzprozess zur Herstellung von Otto- und Dieselmotorkraftstoff wird in Kapitel 4.3.1.2 dargestellt.

Tab. 4-6: Zusammenfassung der untersuchten Umwandlungsketten im Anhang

Treibstoff		Beschreibung	Tabellenanhang	Bewerteter Prozess
1	Benzin	Ottokraftstoff	<u>Tab. 7-8a - i</u>	<u>Tab. 7-8a</u> (-1-)
			<u>Tab. 7-9a - i</u>	<u>Tab. 7-9a</u> (-1-)
2	Diesel	Dieselmotorkraftstoff	<u>Tab. 7-10a - h</u>	<u>Tab. 7-10a</u> (-1-)
			<u>Tab. 7-11a - h</u>	<u>Tab. 7-11a</u> (-1-)
3	CNG	compressed natural gas, komprimiertes Erdgas	<u>Tab. 7-12a - c</u>	<u>Tab. 7-12a</u> (-1-)
			<u>Tab. 7-13a - c</u>	<u>Tab. 7-13a</u> (-1-)
4	LNG	liquefied natural gas, Flüssigerdgas	<u>Tab. 7-14a - b</u>	<u>Tab. 7-14a</u> (-1-)
			<u>Tab. 7-15a - b</u>	<u>Tab. 7-15a</u> (-1-)
5	CGH <sub>2</sub>	compressed gaseous hydrogen, komprimierter Wasserstoff aus Erdgas mit		
a	CGH <sub>2</sub> -ZENT	a) zentraler Erdgasreformierung und	<u>Tab. 7-16a - e</u>	<u>Tab. 7-16a</u> (-1/2-)
b	CGH <sub>2</sub> -DE-Z	b) dezentraler Erdgasreformierung	<u>Tab. 7-17a - e</u>	<u>Tab. 7-17a</u> (-1/2-)
6	LH <sub>2</sub>	liquefied hydrogen, Flüssigwasserstoff aus		
a	LH <sub>2</sub> -FOSSIL	a) Erdgas (zentrale Reformierung)	<u>Tab. 7-18a - d</u>	<u>Tab. 7-18a</u> (-1/2-)
b	LH <sub>2</sub> -REG	b) Elektrolyse, Erneuerbarer Energie, Wind, Wasser	<u>Tab. 7-19a - d</u>	<u>Tab. 7-19a</u> (-1/2-)
7	a	Methanol aus		
	MeOH	a) Erdgas (zentrale Erdgassynthese)	<u>Tab. 7-20a - f</u>	<u>Tab. 7-20a</u> (-1/2-)
	BioMeOH	b) Biomasse	<u>Tab. 7-21a - e</u>	<u>Tab. 7-21a</u> (-1/2-)
8	DME	Dimethylether	<u>Tab. 7-22a</u>	<u>Tab. 7-22a</u> (-1-)
			<u>Tab. 7-23a</u>	<u>Tab. 7-23a</u> (-1-)
9	BioEtOH	Ethanol aus biogenen Quellen	<u>Tab. 7-24a - c</u>	<u>Tab. 7-24a</u> (-1-)
			<u>Tab. 7-25a - c</u>	<u>Tab. 7-25a</u> (-1-)
10	RME	Rapsölmethylester	<u>Tab. 7-26a - c</u>	<u>Tab. 7-26a</u> (-1-)
			<u>Tab. 7-27a - c</u>	<u>Tab. 7-27a</u> (-1-)
11	EVU-Strom	Strom, öffentliches Netz der Energieversorgungsunternehmen (Niederspannung)	<u>Tab. 7-28a - c</u>	<u>Tab. 7-28a</u> (-1-)
			<u>Tab. 7-29a - c</u>	<u>Tab. 7-29a</u> (-1-)

#### Komprimiertes Erdgas / Flüssigerdgas (Treibstoff-Nr. 3, 4)

Erdgas dient als Primärenergieträger für die Aufbereitung zu Druckerdgas und Flüssigerdgas, sowie für Herstellungsprozesse in der Wasserstoff- und Methanolproduktion. In Deutschland ist die Erdgasqualität maßgeblich vom Explorationsort abhängig. Der Erdgasmix setzt sich aus Gas aus Deutschland, den Niederlanden, Norwegen und Russland zusammen. Die verwendeten Daten nach ([71], [76], [122], [193]) berücksichtigen neben den Prozessdaten für Exploration, Förderung, Transport und Verteilung ebenfalls direkte Emissionen durch Leckagen und Erdgas-Abfackelung. Für die Verdichtung des Erdgases auf 250 bar wird der zukünftige Strommix 2010 in Deutschland berücksichtigt. Das Prinzip der Erdgasverflüssigung (-163° C) besteht in der

stufenweisen Abkühlung des Gases bei einem Druck von ca. 40 bar. Sie erfolgt mit Hilfe eines Kältemittelgemisches, das in einem oder mehreren Kreisläufen geführt wird. Unterhalb der Inversionstemperatur des Erdgases wird der Joule-Thomson-Effekt angewendet. Unter Druck stehende reale Gase erniedrigen dabei bei gedrosselter Entspannung ihre Temperatur. Für Flüssigerdgas wird nach ([71], [76], [122], [164]) eine großtechnische Verflüssigungsanlage angenommen.

Wasserstoffherzeugung durch Reformierung von Erdgas (Treibstoff-Nr. 5, 6a)

Wasserstoff ist ein Sekundärenergieträger, d.h. Wasserstoff wird aus wasserstoffreichen Primärenergieträgern hergestellt oder durch eine Wasserelektrolyse erzeugt. Die verwendeten Emissionsdaten für die Wasserstoffherzeugung wurden in ([71], [122], [164], [193]) veröffentlicht.

Die Wasserstoffherzeugung durch Reformierung besteht aus vier grundsätzlichen Verfahrensschritten. Das Erdgas wird entschwefelt und dann der Dampfreformierung zugeführt. Reformierungs- und Konvertierungsreaktion laufen simultan ab.



Das wasserstoffreiche Synthesegas wird abschließend durch eine Druckwechseladsorption von dem im Reaktionsgas enthaltenen Kohlendioxid befreit. Das Gas wird dabei unter Druck über Molekularsiebe geleitet, die bevorzugt die schweren, polaren Kohlendioxidmoleküle bis zu einer definierten Beladungsgrenze aufnehmen.

Wasserstoffherzeugung durch Wasserelektrolyse (Treibstoff-Nr. 6b)

Eine direkte thermische Wasserzersetzung ist nur bei Temperaturen oberhalb von 2.000 K möglich. Durch den Einsatz von elektrischer Energie kann eine Zersetzung auch bei Raumtemperatur durchgeführt werden. Eine Elektrolysezelle besteht aus einer negativen Elektrode (Kathode), einer positiven Elektrode (Anode) und einem Separator, der Kathoden- und Anodenraum voneinander trennt, um eine Vermischung der Gase zu verhindern.

Tab. 4-7: Elektronenreaktion und Ionenleitung bei Wasserelektrolyse in Abhängigkeit von der Art des Elektrolyten

Art des Elektrolyten	Kathodenreaktion	Anodenreaktion
Fester Protonenleiter	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^-$
Säure	$2\text{H}_3\text{O}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}_3\text{O}^+ + 2\text{e}^-$
Base	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$2\text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
Fester Sauerstoffionenleiter	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$	$\text{O}^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^-$

Dieser Separator (Diaphragma) muss für Ionen durchlässig und für Elektronen undurchlässig sein. Die Wasserelektrolyse besteht aus zwei Teilreaktionen an Anode und Kathode, wobei

die Elektrodenreaktion von der Art des Elektrolyten abhängig ist. Der Elektrolyt bestimmt auch das den Strom leitende Ion sowie die Richtung der Wasserdiffusion (Tab. 4-7).

Druckwasserstoff/ Flüssigwasserstoff (Treibstoff-Nr. 5, 6)

Die weitere Aufbereitung des gasförmigen Wasserstoffes hängt maßgeblich vom verwendeten Speichersystem ab (Anhang, Tab. 7-33). Für die Verdichtung von Wasserstoff werden in der Regel Kolbenkompressoren verwendet. Für den Verdichterbetrieb wird nach ([71], [122], [164], [193]) elektrischer Strom verwendet.

Bei der Verflüssigung von Wasserstoff wird eine hohe Reinheit benötigt. Für die Reinigung wird üblicherweise die Adsorption in unterkühlten flüssigen Kohlenwasserstoffen oder die physikalische Adsorption an geeigneten Adsorbentmaterialien angewendet. Für Wasserstoff ist – anders als für Erdgas – eine isotherme Verdichtung und anschließende isentrope Expansion bis zur vollständigen Kondensation wegen des benötigten hohen Druckniveaus ( $> 10^5$  bar) nicht möglich. Als kostengünstigste Lösung haben sich die Varianten des zweistufigen Claude-Prozesses mit Turbinen als Expansionsmaschinen erwiesen. Zunächst wird dabei das Arbeitsmedium Wasserstoff komprimiert und mit flüssigem Stickstoff vorgekühlt. Dann wird der 80 K kalte Massenstrom in zwei Teile aufgeteilt. Ein Teil wird durch zwei hintereinandergeschaltete Expansionsturbinen geleitet, die die Kälteleistung erbringen, mit der der andere Teilstrom bis auf 30 K heruntergekühlt wird. Während der expandierte, „warme“ Teilstrom wieder neu verdichtet und in den Prozess zurückgeführt wird, wird der „kalte“ Wasserstoff durch eine anschließende Entspannung in einem Joule-Thomson-Ventil vollständig kondensiert und erreicht die Endtemperatur von 21 K. Um sicherzustellen, dass der Anteil von Ortho-Wasserstoff (parallele Ausrichtung der Spins) und Para-Wasserstoff (antiparallele Ausrichtung der Spins) sein Gleichgewichtsverhältnis erreicht (25% Para-H<sub>2</sub> bei 293 K, 99,8% Para-H<sub>2</sub> bei 20,4 K) und sich dieses nicht erst im Verlauf mehrerer Tage – unter freiwerdender Umwandlungswärme – einstellt, wird der Ortho-Para-Umwandlungsprozess durch Katalysatoren aus Eisenoxid beschleunigt. Die Bilanzdaten für das großtechnische Verfahren werden nach ([71], [122], [164], [193]) verwendet.

Methanolsynthese (Treibstoff-Nr. 7)

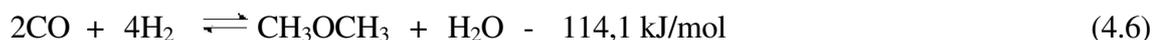
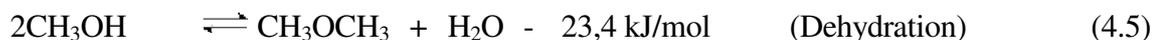
Der eigentlichen Methanolsynthese geht die Erzeugung eines Synthesegases aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Restgehalten an nicht umgesetztem Methan und Stickstoff als inertem Gas voraus. Der endotherme Reformierungsprozess bietet eine Synthesegaszusammensetzung, mit der die Methanolsynthese ohne Zugabe von Kohlendioxid betrieben werden kann. Die heterogen katalysierte Umsetzung des Synthesegases zu Methanol und Wasser wird unter Drücken von 40-110 bar und Temperaturen von 493-553 K durchgeführt.



Die Daten der Emissionsbilanz werden nach ([71], [76], [122], [193]) verwendet.

Dimethylethersynthese (Treibstoff-Nr. 8)

Für die Herstellung von Dimethylether erfolgt eine Kombination mit der Methanolssynthese. Der Vorteil liegt darin, dass das methanolreiche Synthesegasgemisch nicht zusätzlich gereinigt werden muss. Die Reaktion findet in einem Reaktor statt. Abschließend muss das produzierte DME ebenfalls gereinigt werden.



Die vorliegenden Emissionsdaten gelten für das großtechnische Verfahren der Firma Topsoe und sind ([71], [98], [122]) entnommen.

Biogene Energieträger (Treibstoff-Nr. 7b, 9, 10)

Die untersuchten Energieträger Methanol und Ethanol werden auch in Szenarien untersucht, in denen der Primärenergieträger biogenen Ursprunges ist. Bei Methanol handelt es sich um Holz, bei Ethanol um Zuckerrüben. In [193] wurde für die Methanolsynthese eine Anlage zugrunde gelegt, die als Konzept vom Paul-Scherrer-Institut, Schweiz verfolgt wird. Wesentliche Nebenprodukte sind Strom und Wärme. Das Konzept weist jedoch einen vergleichsweise geringen Wirkungsgrad für die Methanolproduktion auf.

Die Daten für Ethanol berücksichtigen die Herstellung aus Zuckerrüben. Zur Alkoholgewinnung eignen sich generell alle Pflanzen mit hohem Zucker- oder Stärkegehalt (z.B. Zuckerrüben, Zuckerrohr, Kartoffeln). Der flächenbezogene Ethanolertrag ist für Zuckerrüben am größten. Aus der Pflanze werden Zucker oder Stärke herausgelöst. Diese Lösung wird mit Wasser und Hefe vermischt und vergoren, so dass nach dem Herausfiltern der Feststoffe ein Wasser-Ethanolgemisch entsteht. Durch mehrmalige Destillation wird hochprozentiger, brennbarer Alkohol gewonnen.

Eine umfassende Bilanzierung der ökologischen Auswirkungen von Rapsöl und Rapsölmethylester (RME) im Vergleich zu Dieselkraftstoff wurde durch das Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg 1999 vorgelegt [250]. Die Bilanzierung erfolgt im Vergleich zu einer Nutzung als Brachfläche, für das Koppelprodukt Glycerin und für den Rapsextraktionsschrot erfolgt eine Gutschrift. Die in dieser Arbeit verwendeten Daten wurden in [187] veröffentlicht.

Alle vorliegenden Emissionsdaten für biogene Treibstoffe sind ([71], [76], [98], [122], [187], [193]) entnommen.

Strommix 2010 (Treibstoff-Nr. 11)

Die Beurteilung der Umwandlungskette in der Stromerzeugung hängt sehr stark vom Wirkungsgrad, dem Stand der Abgasreduktion bei Großfeuerungsanlagen und der Energieerzeugungsstruktur ab. Ein Vergleich der zukünftigen Energieerzeugungsstruktur (2010) mit der Stromerzeugungsstruktur früherer Jahre (1990) in Abb. 7-13 (Anhang) zeigt, dass strukturelle Änderungen, etwa eine Zunahme erneuerbarer Energieträger oder eine Zunahme gasbetriebener

Energieerzeuger, nur langsam umgesetzt werden. Ausstiegsszenarien hinsichtlich einer Reduktion des Anteiles der Kernenergie am Energiemix werden nicht berücksichtigt.

Alle vorliegenden Emissionsdaten für die Stromproduktion sind ([71], [122], [191]) entnommen.

#### 4.3.1.2 Referenzprozess

Bei dem verwendeten Referenzprozess handelt es sich um die Nutzung von schwefelarmen und schwefelfreien Ottokraftstoffen. Die Herstellung von Otto- und Dieseldieselkraftstoff sind in der Raffinerie eng verzahnt. Daher werden beide Prozesse hinsichtlich ihrer Besonderheiten beschrieben. Da Benzin-Pkw zur Zeit den höchsten Anteil an Fahrzeugen und Fahrleistungen ausmachen, wird der Benzin-Pkw und somit auch die Benzinproduktion als Referenz herangezogen.

##### Otto-/Dieseldieselkraftstoffe (Treibstoff-Nr. 1, 2)

Bei der emissionsseitigen Bilanzierung zukünftiger Kraftstoffqualitäten für Benzin und Diesel aus Rohöl müssen folgende Sachverhalte berücksichtigt und gegeneinander abgewogen werden.

- (1) Entwicklung des Inlandabsatzes von rohölbasierten Produkten,
- (2) Zukünftige Veränderung der Produktzusammensetzung  
(mehr Mitteldestillat, weniger schweres Heizöl),
- (3) Auswirkungen der geänderten Qualitätsanforderungen an Ottokraftstoffe, Diesel, leichtes Heizöl (Schwefelgehalt, Benzolgehalt, Aromatengehalt) und
- (4) Potentiale für Energieeinsparmaßnahmen der Raffinerien.

Mit einem zunächst stagnierenden und mittelfristig zurückgehenden Absatz von Benzin- und Dieseldieselkraftstoffen (1) ist – zunächst unter hypothetischer Berücksichtigung von gleichbleibenden Produkthanforderungen – bei gleichbleibenden spezifischen Emissionen je produzierter Tonne von einer Minderung der absoluten Emissionen auszugehen.

Durch eine Zunahme des Absatzes an Mitteldestillat (Flugturbinentreibstoff, Diesel, leichtes Heizöl) und einem starken Rückgang an schwerem Heizöl (2) werden zukünftig die Raffinerien durch verschiedene Crackverfahren (z.B. Hydrocracken) aus schweren Zwischenprodukten vor allem mehr Mitteldestillate erzeugen. Das Hydrocracken hat den Vorteil, dass sich je nach Katalysator und Betriebsbedingungen die gewünschte Ausbeute bestimmen lässt. So kann man im Hydrocracker entweder fast ausschließlich Benzin oder vorwiegend Dieseldieselkraftstoff und leichtes Heizöl bei einem geringen Benzinanteil gewinnen. In [133] wurde anhand einer Modellraffinerie ein spezifischer Brennstoffmehrverbrauch von 3% bei einer Zunahme des Anteiles an Mitteldestillat am Produktausstoß von 45% auf 52% ermittelt.

Durch gestiegene Anforderungen an die Produktqualität (3), besonders die Senkung des Schwefelgehaltes, des Aromatengehaltes und des Benzolgehaltes ist eine geringfügige Erhöhung des Energieverbrauches der Raffinerien zu erwarten. Die Verwendung neuer Katalysatortypen in den Raffinerien kann energiebezogene Nachteile zum Teil ausgleichen.

Letztlich steht dem geringfügig gestiegenen spezifischen Mehrverbrauch ein Minderverbrauch durch Energieeinsparungen (4) gegenüber. In den 80er Jahren konnte der spezifische Energieverbrauch der Raffinerien bereits um 20% gesenkt werden. Durch weitere Verbesserungen der Destillation, einer weiteren Integration der Prozessführung, einer weiteren Steigerung des Ofenwirkungsgrades und durch weitere Optimierungen der Betriebsführung wurden in [57] Einsparpotentiale von insgesamt 22% benannt.

Stellt man die in [133] ermittelten Verbräuche vergleichend gegenüber, so ergibt sich für die Kraftstoffqualitäten des Jahres 2010 ein Mehrverbrauch und somit eine höhere Emission zwischen 0 und 5%. Es wird deutlich, dass die neuen Qualitätsanforderungen der Raffinerieprodukte nicht allein für Änderungen des Energieflusses in Raffinerien verantwortlich sind. Eine eindeutige Aussage hinsichtlich eines Mehrverbrauches in Raffinerien durch die Herstellung neuer Kraftstoffqualitäten kann daher nicht abgeleitet werden.

Deshalb werden sowohl für den Referenzprozess, als auch für die Bewertung zukünftiger Konzepte 2010 die in ([71], [122], [191]) ermittelten Daten für die Bilanzierung und Bewertung herangezogen.

#### 4.3.2 Stoffspezifische Emissionen

Zusätzlich zu den aus Literatur- und Modelldaten übernommenen Emissionen der Treibstoffkette müssen die stoffspezifischen Emissionen erhoben werden. Dies gilt für die Ermittlung der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen, der direkten SO<sub>2</sub>-Emissionen und des Energieverbrauches. Der heizwertbezogene Verbrauch ( $B'_e$ ) berechnet sich aus dem Produkt aus Treibstoffverbrauch und spezifischem Heizwert des verwendeten Energieträgers.

$$B'_e = B_e \cdot H_u \quad (4.7)$$

$B_e$	streckenbezogener Treibstoffverbrauch in [l/km] oder [g/km]
$H_u$	spezifischer Heizwert gemäß <u>Tab. 7-1</u> (Anhang) in [MJ/l] oder [MJ/kg]

Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen ( $CO_{2\text{spezifisch}}$ ) durch die direkte Nutzung der Energieträger, wie zum Beispiel durch die Nutzung als Treibstoff in Kfz, ergeben sich aus Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei vollständiger Oxidation.

$$\text{CO}_{2_{\text{spezifisch}}} = \frac{C_C \cdot M_{\text{CO}_2}}{H_u \cdot M_C} \quad (4.8)$$

$C_C$	Kohlenstoffkonzentration in [% m/m]	
$H_u$	spezifischer Heizwert gemäß <u>Tab. 7-1</u> (Anhang) in [MJ/l] oder [MJ/kg]	
$M_C$	Molmasse von Kohlenstoff	12,011 g/mol
$M_{\text{CO}_2}$	Molmasse von Kohlendioxid	44,0098 g/mol

Eine Zusammenfassung der spezifischen  $\text{CO}_2$ -Emissionen findet sich in Tab. 7-1 (Anhang). Die absolute direkte  $\text{CO}_2$ -Emission ( $\text{CO}_{2_{\text{absolut}}}$ ) wird aus dem Produkt der spezifischen  $\text{CO}_2$ -Emission des Energieträgers und dem heizwertbezogenen Verbrauch ermittelt:

$$\text{CO}_{2_{\text{absolut}}} = B'_e \cdot \text{CO}_{2_{\text{spezifisch}}} \quad (4.9)$$

In gleicher Weise werden die direkten spezifischen Emissionen von Schwefeldioxid ( $\text{SO}_{2_{\text{spezifisch}}}$ ) ermittelt:

$$\text{SO}_{2_{\text{spezifisch}}} = \frac{C_S \cdot M_{\text{SO}_2}}{H_u \cdot M_S} \quad (4.10)$$

$C_S$	Schwefelkonzentration in [% m/m]	
$H_u$	spezifischer Heizwert gemäß <u>Tab. 7-1</u> (Anhang) in [MJ/l] oder [MJ/kg]	
$M_S$	Molmasse von Schwefel	32,066 g/mol
$M_{\text{SO}_2}$	Molmasse von Schwefeldioxid	64,0648 g/mol

Eine Zusammenfassung der spezifischen  $\text{SO}_2$ -Emissionen findet sich in Tab. 7-1 (Anhang). Auch hier ergibt sich aus der vollständiger Oxidation näherungsweise und mit einer Abweichung um 1<sup>0</sup>/<sub>100</sub> folgendes Ergebnis für die absoluten streckenbezogenen  $\text{SO}_2$ -Emissionen ( $\text{SO}_{2_{\text{absolut}}}$ ):

$$\text{SO}_{2_{\text{absolut}}} = B'_e \cdot C_S \cdot 2 \quad (4.11)$$

### 4.3.3 Fahrzeugbetrieb

Die Umweltwirkungen des Fahrzeugbetriebes hängen im wesentlichen vom Verbrauch, der daraus resultierenden direkten CO<sub>2</sub>-Emission und der Zusammensetzung der Abgaskomponenten ab. Während der Verbrauch maßgeblich vom Fahrzeuggewicht, der Antriebsvariante und deren Wirkungsgrad im Fahrzyklus beeinflusst wird, hängen die CO<sub>2</sub>-Emissionen vom Verbrauch und dem Kohlenstoffgehalt des eingesetzten Energieträgers ab. Die Abgaskomponenten sind wiederum von der Abgasstufe, der damit verbundenen Abgasnachbehandlungstechnologie, und, besonders für nicht-limitierte Komponenten, vom eingesetzten Energieträger, dessen Qualität und Umwandlungsverfahren abhängig.

Nach einer prinzipiellen Beschreibung der untersuchten Antriebsvarianten im folgenden Kapitel 4.3.3.1 werden das Vorgehen der Fahrzeugmodellierung (Kapitel 4.3.3.2) und die daraus resultierenden Verbrauchswerte (Kapitel 4.3.3.3) dargestellt. Nähere Erläuterungen zur Auswahl des Referenzantriebes werden in Kapitel 4.3.3.4 gegeben. Die untersuchten Abgaskonzepte werden in Kapitel 4.3.3.5 beschrieben. In Tab. 7-49 findet sich eine Übersicht mit dem Verzeichnis aller untersuchten Varianten.

#### 4.3.3.1 Eigenschaften der Antriebe

In Tab. 4-4 ist die grundlegende Matrix für den vorliegenden Vergleich dargestellt. In diesem Kapitel folgt eine allgemeine Beschreibung der untersuchten Antriebskonzepte. Alle relevanten technischen Daten der Varianten finden sich im folgenden Kapitel 4.3.3.2. Die verwendeten Ziffern zur Kennzeichnung der Fahrzeuge können auch Tab. 4-11a bis Tab. 4-11c entnommen werden. In Tab. 7-49 findet sich eine Übersicht mit dem Verzeichnis aller untersuchten Varianten.

#### Gegenüberstellung von Otto- und Dieselmotoren (Fahrzeug-Nr. 1, 12)

Verbrennungsmotoren sind Energiewandler, die die chemische Energie im Kraftstoff durch Verbrennung in thermodynamischen Kreisprozessen in Nutzarbeit (Druck-Volumen-Arbeit) umwandeln. Vor der Zündung ist der Kraftstoff aufzubereiten, um ein zündfähiges Gemisch bereitzustellen.

Beim Dieselmotor wird bei der inneren Gemischbildung im Bereich des oberen Totpunktes (OT) in die hoch verdichtete und erwärmte Luft Kraftstoff eingespritzt. Bei der äußeren Gemischbildung des klassischen Ottomotors wird außerhalb des Arbeitsraumes der Kraftstoff durch eine Saugrohreinspritzung der Luft zugeführt. Beim klassischen Dieselmotor liegt ein heterogenes Kraftstoff-Luftgemisch vor, während der Zylinder des Ottomotors mit einem homogenen Gemisch gefüllt wird. Die Zündung erfolgt beim Ottomotor als sog. Vormischflamme durch eine Zündkerze, sofern das homogene Gemisch innerhalb der Zündgrenzen liegt, während beim Dieselmotor eine Selbstzündung mit Diffusionsflamme eintritt, sofern in einem begrenzten Bereich ein zündfähiges Gemisch vorliegt. Zur Homogenisierung des Kraftstoff-Luft-Gemisches werden beim Dieselmotor die Einspritz-Strahlenergie (Einspritzdrücke bis ca. 2.000 bar) und ein im Brennraum erzeugter Drall ausgenutzt. Die Leistung des Ottomotors kann bei gleichbleiben-

dem homogenen Gemisch nur über eine Quantitätssteuerung geregelt werden, während die Leistung des Dieselmotors drosselfrei über das Luftverhältnis durch eine sog. Qualitätssteuerung eingestellt wird. Eine Übersicht liefert Tab. 4-8.

Tab. 4-8: Vergleich der Merkmale von klassischen Diesel- und Ottomotoren [33]

Merkmale	Dieselmotor	Ottomotor (Saugrohreinspritzung)
<b>Gemischbildung</b>	innerhalb des Zylinders	außerhalb des Zylinders
<b>Gemisch</b>	heterogen	homogen
<b>Zündung</b>	Selbstzündung bei globalem Luftüberschuss	Fremdzündung innerhalb Zündgrenzen
<b>Luftverhältnis (global)</b>	$\lambda > 1$	$\lambda = 1$ <sup>1)</sup>
<b>Verbrennung</b>	Diffusionsflamme	Vormischflamme
<b>Drehmoment-Änderung durch</b>	Änderung über das Luftverhältnis (Qualitätsänderung)	Gemischdrosselung (Quantitätsänderung)
<b>Kraftstoffanforderungen</b>	Zündwilligkeit (hohe Cetanzahl)	Klopffestigkeit (hohe Oktanzahl)

<sup>1)</sup> Stöchiometrischer Betrieb ist in weiten Kennfeldbereichen für die effektive Funktion des Katalysators notwendig.

#### Einfluss von Leichtlaufölen und Leichtlaufreifen (Fahrzeug-Nr. 5, 6)

Die Verminderung der Reibung hat großen Einfluss auf die Gesamtenergieumwandlung im Motor. Das mögliche Einsparungspotential an Kraftstoff durch Ersatz eines konventionellen Motoröls durch ein Leichtlauföl (z.B. 0W30, 5W30) ist durch verschiedene Messungen und Tests mehrfach ermittelt worden (siehe auch Tab. 7-34, Anhang). Lärmarme und rollwiderstandsarme Reifen zeichnen sich durch verminderte Rollwiderstände, verminderte Geräusentwicklung und eine Kraftstoffersparnis aus. In nahezu jeder Reifenkategorie können heute Leichtlaufreifen von verschiedenen Anbietern erworben werden [248].

#### Fahrzeuge mit Benzin-Direkteinspritzung (Fahrzeug-Nr. 2, 7)

Wirkungsgradverbesserungen von Ottomotoren können durch verschiedene motortechnische Maßnahmen erreicht werden. Hierzu gehören neben drosselfreier Laststeuerung durch variable Ventiltriebe, Drosselvorrichtungen für einzelne Einlasskanäle und Zylinderabschaltungen im Teillastbetrieb auch die Benzin-Direkteinspritzung. Die Benzin-Direkteinspritzung ist in diesem Kontext eine der besonderen Technologien zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und des Kraftstoffverbrauches. Dieser Vorteil steht dem erhöhten Entwicklungs- und Kostenaufwand für die Brennverfahrensentwicklung, die Brennverfahrensapplikation, die Abgasnachbehandlungstechnologie und die Kraftstoffeinspritzsysteme gegenüber.

Die Benzin-Direkteinspritzung arbeitet mit Einspritzdrücken von 80 bis 120 bar – im Vergleich zu 2 bis 5 bar bei Saugrohreinspritzung – und ermöglicht Verbrauchsvorteile durch den drosselfreien und mageren Betrieb. Bei der direkten Einspritzung des Kraftstoffes in den Brennraum bestimmt der Zeitpunkt des Einspritzvorganges den Zeitraum für die Gemischbildung. Die späte Einspritzung ermöglicht ein mageres Kraftstoff/Luft-Verhältnis und die daraus resultierende Ladungsschichtung. Die frühe Einspritzung während des Saughubes ermöglicht eine weitgehende homogene Zylinderladung, wie sie bei hoher Teillast und Vollast erforderlich ist.

Neben den Verbrauchsvorteilen durch die Entdrosselung sind durch die innenkühlende Wirkung der Kraftstoffverdampfung höhere Vollastmitteldrücke erreichbar. Durch die Nutzung der Ladungsbewegung beim Ansaugvorgang und durch die Gestaltung der Kolbenmulde und des Brennraums kann die Gemischbildung gesteuert werden. Die Direkteinspritz-Brennverfahren lassen sich in strahlgeführte, wandgeführte und luftgeführte Verfahren unterteilen. In der Praxis finden sich jedoch in der Regel Systeme, die nicht immer eindeutig den einzelnen Brennverfahren zugeordnet werden können (Tab. 4-9). Strahlgeführte Verfahren stehen gegenwärtig vor der Serieneinführung.

Tab. 4-9: Gegenüberstellung der Benzin- Direkteinspritz-Brennverfahren

Eigenschaften	Strahlgeführte Brennverfahren	Wandgeführte Brennverfahren	Luftgeführte Brennverfahren
<b>Gemischbildung Ausbildung der Ladungsschichtung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraftstoffstrahl</li> <li>• Schicht mit zündfähigem Gemisch bildet sich am äußersten Strahlrand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraftstoffstrahl auf die Brennraumwand</li> <li>• zündfähiges Gemisch bildet sich durch Abdampfen und Mischen mit der Verbrennungsluft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zusammenwirkung aus Kraftstoffspray und gerichtete Strömung der Zylinderladung</li> </ul>
<b>Typische Konstruktion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enge räumliche Zuordnung von Kraftstoffinjektor und Zündkerze</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brennraumwand für Gemischsteuerung ist i.d.R. Kolbenmulde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• großer Abstand zwischen Kraftstoffinjektor und Zündkerze</li> <li>• Verbrennungsluftströmung wird durch Brennraumgestaltung stabilisiert</li> </ul>
<b>Typische Eigenschaften</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Anforderungen an die Kraftstoffinjektoren (Streuung, Empfindlichkeit für Sprayqualität)</li> <li>• zu geringe Turbulenzen in Teillast durch den Einspritzstrahl</li> <li>• hoher Vorzündbedarf</li> <li>• Ausgedehnte Zonen mit überfettetem Gemisch in Teillast (Rußbildung)</li> <li>• Günstige Vollastbedingungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• speziell abgestimmte Ladungsbewegungen (Drall, Tumble) erforderlich</li> <li>• hohe Gemischaufbereitungszeit über der Kolbenmuldenoberfläche</li> <li>• hohe Betriebsstabilität im Teillastbetrieb</li> <li>• teilweise verzögerte Gemischbildung (verschlepptes Brennende, HC-Emission)</li> <li>• Schichtbetrieb bei Kaltstart eingeschränkt</li> <li>• zerklüfteter Brennraum ist Nachteil für günstige Vollastbedingung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraftstoff wird im Brennraum verdampft, erreicht nicht die Brennraumwand</li> <li>• vergleichsweise niedrige HC-Emissionen, kein Ruß</li> <li>• kurze Gemischaufbereitungszeit bei hoher Gemischgüte</li> <li>• geringe Ladungsintensität bei niedrigen Drehzahlen behindert Gemischtransport zur Zündkerze</li> <li>• variable Beeinflussung der Ladungsbewegung ermöglicht ausreichend hohe Abgastemperaturen für Abgasnachbehandlung</li> </ul>

Die Verbrauchsvorteile der Benzindirekteinspritzung werden in [155] für die von der Volkswagen AG entwickelte Schichtladetechnologie auf rund 15% quantifiziert. Diese errechnen sich aus

- 10% Verbrauchsvorteil durch Schichtladeverbrennung,
- 2% Verbrauchsvorteil durch Innenkühlung des Kraftstoff, resultierende geringere Klopfneigung an Vollast und oberer Teillast und Anhebung des Verdichtungsverhältnisses,
- 1,5% Verbrauchssenkung durch die Senkung der Leerlaufdrehzahl (stabile Verbrennung) und
- 1,5% Verbrauchsvorteil durch gutes Ansprechverhalten wegen geringer Wandfilmproblematik im Vergleich zur Saugrohreinspritzung, daraus resultierende geringere Anfettungen bei verbessertem Instationärverhalten mit erhöhten Abgasrückführungsraten.

Durch eine betriebspunktabhängige Anhebung der Kühlwassertemperatur von 90° C auf 110° C können im Schichtladebetrieb zusätzliche verbrauchsabhängige Verbesserungen von durchschnittlich 1-3% erreicht werden.

Hubraumreduzierter Antrieb (Downsizing) mit Aufladung (Fahrzeug-Nr. 8)  
und weitere technische Maßnahmen an Ottomotoren

Durch die Erhöhung des Mitteldrucks lässt sich bei gleichem Hubraum die effektive Leistung steigern. Bei kleinerem Hubraum werden gleiche Leistungsdaten wie mit einem Motor mit größerem Hubvolumen erreicht. Da kleinere Motoren geringere absolute Reibleistungen besitzen, wird der Betriebspunkt bei gleicher Leistung zu höheren thermischen Wirkungsgraden verschoben. Neben den Maßnahmen des Downsizing kann der thermische Wirkungsgrad durch weitere Maßnahmen erhöht werden.

Durch die Abschaltung mehrerer Zylinder im Teillastbetrieb, werden die Betriebspunkte im Kennfeld zu höhern Lasten verschoben. Der spezifische Verbrauch sinkt somit im Teillastbetrieb, während unter höheren Lastbedingungen mit zugeschalteten Zylindern das maximale Drehmoment genutzt werden kann. Bei kleineren Motoren hat die Zylinderabschaltung jedoch nur ein geringes Einsparpotential, da der Betrieb mit verringerter Zylinderzahl nur bis etwa zur halben Last des Motors möglich ist und die Verweilzeiten in den günstigen Kennfeldbereichen damit verhältnismäßig kurz sind [107].

Bei Ottomotoren lässt sich der thermische Wirkungsgrad durch eine Vergrößerung der Ladungsmenge verbessern. Die Aufladung des Motors kann technisch unterschiedlich umgesetzt werden. Die mechanische Aufladung weist sich durch einen zeitlich verzögerungsfreien Aufbau der Aufladung aus. Die Antriebsarbeit des Laders muss zusätzlich vom Motor geleistet werden. Höhere Kosten und ein zum Teil höheres Gewicht als bei Abgasturboladern können sich nachteilig auswirken. Der Extremfall eines aufgeladenen Zweizylinder-Ottomotors wird in ([108], [138]) beschrieben. Es handelt sich um einen Motor mit einem Hubraum von 360 cm<sup>3</sup>, einem Druckwellenlader (Comprexlader) und einer Leistung von 40 kW. Das Konzept wird in dieser Arbeit ebenfalls bewertet.

### Elektromechanische Ventiltriebe (Fahrzeug-Nr. 3)

Mit elektromechanischen Ventiltrieben, als konkretes Ausführungsbeispiel am Referenzmotor, können durch die variable Steuerung der Gaswechselventile die Drosselverluste weitgehend vermieden werden. Zusätzlich ermöglicht die Maßnahme besonders bei Motoren mit großen Zylinderzahlen eine partielle Abschaltung der Zylinder und erreicht so bei Motoren mit sechs und mehr Zylindern sein höchstes Verbrauchsminderungspotential. Ergänzend kann das Übersetzungsverhältnis des Antriebes angepasst und die Leistung der Ölpumpe reduziert werden [206]. Im NEFZ kann der Motor bis auf den Leerlaufbereich mit Zylinderabschaltung betrieben werden. Die erhöhte Zylinderfüllung der angesteuerten Zylinder verbessert die Verbrennungsstabilität und den Innenwirkungsgrad. Frei definierbare Umschaltgrenzen ermöglichen an Motoren mit hoher Zylinderzahl Verbrauchsvorteile zum Serienmotor von bis zu 30% in Teillast [91].

Im Zuge des Modells werden aufbauend auf dem Referenzfahrzeug die Potentiale der elektromechanischen Ventiltriebe mit variabler Ein- und Auslasssteuerung nach ([158], [159], [206]) und deren Umwelteigenschaften und Kosten untersucht, da es sich bei dieser Variante um eine Maßnahme handelt, die im Motorenbau prinzipiell weitreichende Verbrauchspotentiale erschließen kann. Da in den Veröffentlichungen konkrete Entwicklungsziele genannt werden, die sich nicht zuletzt auch an konkurrierenden Systemen zur Reduzierung der Drosselverluste von Verbrennungsmotoren orientieren (z.B. variable Nockenwellensteuerung, hydraulische Einlass-Nockenwellenphasenverstellung, Nockenwellenumschaltung), werden in dieser Arbeit exemplarisch die elektromechanischen Ventiltriebe am Referenzmotor untersucht.

### Hybridvariante des Referenz-Pkw (Start/Stop) (Fahrzeug-Nr. 4)

Elektrische Maschinen können das Drehmoment beim Anfahren und in der unteren Teillast unterstützen. Eine elektrische Maschine, die sowohl als Motor, als auch als Generator genutzt wird, wird zwischen Motor und Getriebe angekoppelt. Durch eine direkte Übertragung der Drehmomente auf die Kurbelwelle werden nicht nur Starter und Lichtmaschine überflüssig. Vielmehr unterstützt das System durch den Vorteil hoher Anfahrtdrehmomente elektrischer Maschinen Start/Stop-Systeme und kann auch zur Dämpfung von Motorschwingungen eingesetzt werden. Durch rekuperatives Bremsen kann der Kraftstoffverbrauch zusätzlich reduziert werden. Das in der weiteren Bewertung als Start/Stop-Konzept bezeichnete Hybridkonzept ( $8 \text{ kW}_{\text{elektrisch}}/40 \text{ kW}_{\text{verbrennungsmotorisch}}$ ) auf der Basis des Referenzantriebes ist in Teilen von dem konkreten Ausführungsbeispiel des Honda *Insight* abgeleitet, das z.B. in [32] beschrieben wurde.

### Hybridvarianten im Leichtbau-Pkw (Fahrzeug-Nr. 9-11, 16-19, 24)

Hybridfahrzeuge sind Fahrzeuge mit mindestens zwei unterschiedlichen Energiewandlern und zwei unterschiedlichen Speichersystemen (im Fahrzeug) zum Zwecke des Fahrzeugantriebes. Eine Untergruppe bilden die hybridelektrischen Fahrzeuge, die für den mechanischen Antrieb Energie aus folgenden zwei im Fahrzeug eingebauten Energiequellen zur Energiespeicherung beziehen:

- (1) aus einem zum Verbrauch stehenden Treibstoff (z.B. Benzin, Diesel, Gas) und
- (2) aus einem elektrischen Energiespeicher (z.B. Batterie, Kondensator).

Neben dieser allgemeinen Definition lassen sich Hybridfahrzeuge in Parallelhybride, serielle Hybride und Mischhybride einteilen. In [Abb. 4-3](#) werden die verwendeten Massen der Antriebe der modellierten Diesel-Hybridvarianten gegenübergestellt.

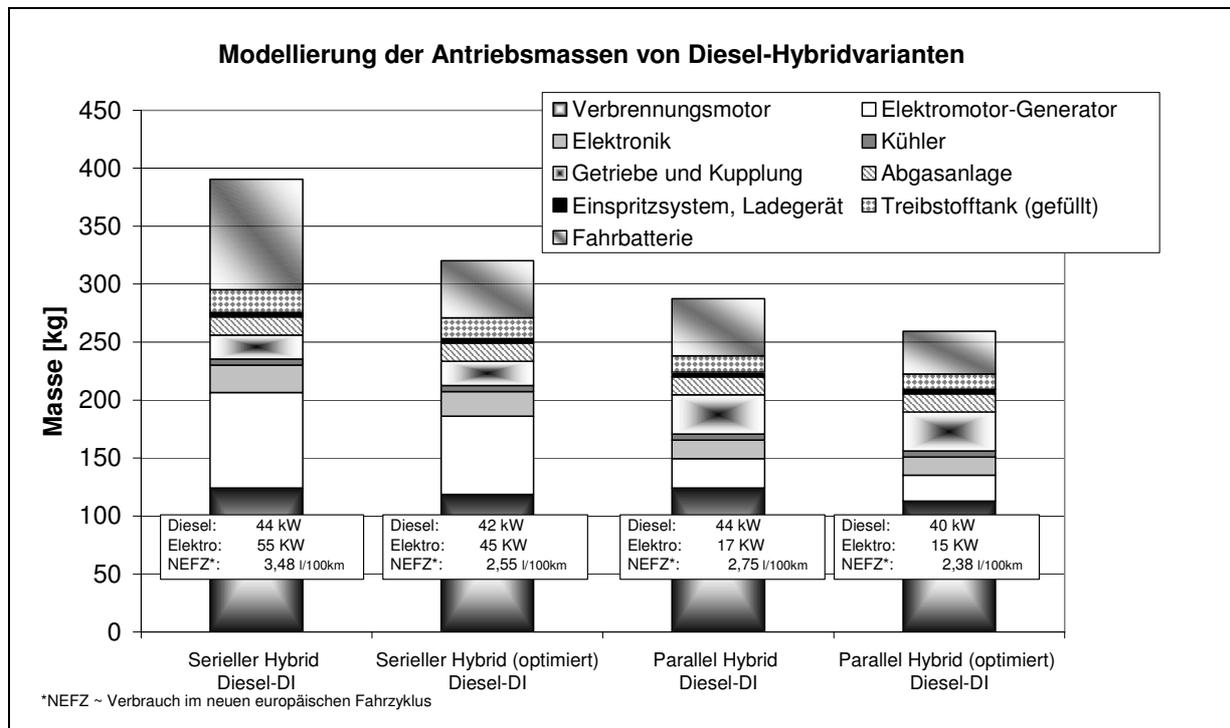


Abb. 4-3: Modellierung der Massen der Antriebe von Diesel-Hybridvarianten (eigene Berechnungen nach [278])

Bei **Parallelhybriden** können der Verbrennungsmotor und der Elektromotor parallel die Räder antreiben. Es kann rein elektrisch, rein verbrennungsmotorisch oder kombiniert gefahren werden. Hybridantriebe besitzen bei dem Gewicht, dem Bauraum und den Kosten der elektrischen Maschine und der Batterie dann Vorteile, sofern sie eine optimal dimensionierte Motor-/Generator-Einheit und eine Batterie mit geringem Energieinhalt bei hoher Zyklfestigkeit besitzen. Dadurch reduziert sich für diese Varianten auch der Anteil des Fahrbetriebes, der ausschließlich elektrisch erfolgt. Durch die Möglichkeit der Drehmomentenaddition beider Antriebe kann der Verbrennungsmotor für Anfahr- und Beschleunigungsvorgänge kleiner ausgelegt werden. Dies ist mit Verbrauchsvorteilen verbunden.

Bei **seriellen Hybriden** erfolgt der Radantrieb immer rein elektrisch. Der Strom wird von einer Verbrennungskraftmaschine in Kombination mit einem Generator oder einem anderen Energiewandler (z.B. Brennstoffzellen) im Fahrzeug erzeugt. Der Energiespeicher ermöglicht die Entkoppelung des Verbrennungsmotors vom Antrieb. Verbrauchsmindernd wirken sich der Betrieb im Bestpunkt der Verbrennungskraftmaschine und die Möglichkeit der Bremsenergieerückgewinnung aus. Da jedoch die gesamte Wirkungsgradkette über den Generator und die elektrische Maschine durchlaufen werden muss, ergeben sich zusätzliche Verluste. Autarke serielle Antriebe mit der Stromerzeugungseinheit (z.B. Verbrennungskraftmaschine und Generator, Brennstoffzelle) müssen auf Dauerhöchstleistung ausgelegt werden.

**Mischhybride** kombinieren die Vorteile der Parallelhybridantriebe mit den Vorteilen der seriellen Antriebe. Durch eine Leistungsverzweigung kann die Antriebsleistung des Verbrennungsmotors auf verschiedenen Wegen zum Rad übertragen werden. Der Verbrennungsmotor kann, abhängig von seinen Kennfeldeigenschaften, direkt das Rad über ein Differenzialgetriebe antreiben oder über einen Generator die elektrische Antriebsmaschine mit Energie versorgen. Dadurch können Stufengetriebe entfallen, der Steuerungsaufwand ist jedoch deutlich komplexer.

Die aus [278] übernommenen Fahrzeugkonzepte berücksichtigen für elektrische Hybridantriebe alle eine autonome Fahrstrategie. In der Praxis bedeutet dies, dass kein Netzstrom zum Fahrzeugbetrieb, sondern ausschließlich die zum Verbrauch stehenden Treibstoffe verwendet werden. Die als „optimiert“ bezeichneten Hybridkonzepte (Abb. 4-3), sowie neuartige Antriebe wie Brennstoffzellenhybridkonzepte befinden sich noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium hinsichtlich der Antriebe, Energiespeicher und sonstiger Energiewandler. Die Angaben zu den Kraftstoffverbrauchswerten und Emissionen sind somit weniger belastbar.

#### Fahrzeuge mit Stirlingmotor (Fahrzeug-Nr. 10)

Der Stirlingmotor arbeitet mit kontinuierlicher äußerer Verbrennung. Ein Wärmetauscher überträgt die Wärmeenergie auf das Arbeitsgas (z.B. Wasserstoff, Helium, Stickstoff, Luft) im Zylinder. Mit einem Verdränger wird das Arbeitsgas zwischen einem Raum konstanter hoher Temperatur und einem Raum konstanter niedriger Temperatur hin- und hergeschoben, wodurch der Innendruck periodisch schwankt. Die Druckschwankungen werden über einen Arbeitskolben und einen Kurbeltrieb in mechanische Energie umgesetzt. Ein Kühler entzieht dabei dem Stirlingmotor Wärme. Hierfür ist zur Wirkungsgradsteigerung zwischen heißem und kaltem Raum ein Regenerator angeordnet. Der Wirkungsgrad des Stirling-Idealprozesses (1. isotherme Kompression, 2. isochore Wärmeaufnahme, 3. isotherme Expansion, 4. isochore Wärmeabfuhr) entspricht dem Carnot-Wirkungsgrad.

Wegen fehlender Sachbilanzdaten für die limitierten Abgasemissionen im Fahrbetrieb und für die Bilanzierung der Antriebsherstellung wird keine Bewertung des Pkw mit Stirlingmotor vorgenommen.

#### Motoren im optimierten Betrieb mit Ethanol und Methanol (Fahrzeug-Nr. 22, 23)

Schon zu Beginn der 80er Jahre wurden Motoren entwickelt, die mit Methanol-Benzin-Mischkraftstoffen betrieben werden konnten. Anfänglich enthielten diese Kraftstoffe lediglich 15% Alkohole, später wurde der Alkoholanteil schrittweise bis auf 100% gesteigert. In der Regel werden die Stoffe in ottomotorischen Brennverfahren eingesetzt. Für den Einsatz im Fahrzeug sind die Alkohole nicht geeignet, da der geringe Dampfdruck Kaltstartprobleme zur Folge hat. Dies konnte durch die Zumischung von Benzin oder durch den Start mit Benzin gelöst werden. Durch die geringe Flammtemperaturen und die hohe Verdampfungswärme der Alkoholkraftstoffe ergeben sich jedoch günstige Magerlauffähigkeiten dieser Treibstoffe bei niedrigen Stickstoffoxidkonzentrationen im Rohabgas. Die umweltbezogenen und kostenseitigen Bilanzen berücksichtigen zunächst einen Ottomotor mit Saugrohreinspritzung. Ein in [140] beschriebenes Glühzündsystem besitzt das Potential Kaltstartprobleme zu minimieren.

Dieselmotoren im optimierten Betrieb mit RME und DME (Fahrzeug-Nr. 13, 14)

Konventionelle Dieselmotoren können an den Betrieb mit RME oder DME angepasst werden. Der heizwertbezogene Verbrauch des Dieselfahrzeuges im RME-Betrieb wird mit dem Dieseltreibstoffverbrauch gleichgesetzt. Unter praktischen Erwägungen bedeutet dies aus Sicht des Anwenders für RME einen volumenbezogenen Kraftstoffmehrverbrauch um 7%. Der Wirkungsgrad im DME-Betrieb wird im NEFZ um 3% erhöht. Die Vorteile von DME liegen in der hohen Cetanzahl von 55-60, verglichen mit der Cetanzahl von Diesel von 50-55. DME wird bei Druck gespeichert und benötigt ein eigenes Niederdruckspeicher- und Einspritzsystem.

Fahrzeuge mit Erdgasverbrennungsmotor (Fahrzeug-Nr. 20, 21)

Grundsätzlich unterscheidet sich ein Erdgasfahrzeug nur in einigen Bauteilen von konventionellen Fahrzeugen mit Ottomotor. Elektronisches Motormanagement, Katalysator und Ottomotor sind beim Gasfahrzeug ähnlich vorhanden wie beim herkömmlichen Auto. Unterschiede zwischen beiden Typen betreffen besonders die Treibstoffspeicher und die Aufbereitung bis zur Verbrennung im Zylinder (Kraftstoffleitungen, Gemischaufbereitung). Die Betankungsarmatur von Erdgasfahrzeugen besteht aus einer genormten Standardbetankungskupplung. Die Betankungsleitung führt von der Betankungsarmatur bis zur Armatur der Druckgasbehälter im Wagen. Sie ist mit zwei Rückschlagventilen gesichert. Die unter 200 bar stehenden Behälter werden zumeist aus gezogenem, legiertem Stahl hergestellt. Ein Hochdruckregler reduziert den Flaschendruck. Der Anschluss an den Kühlkreislauf des Motors verhindert eine Vereisung des Hochdruckreglers. Flüssigerdgas wird bei  $-162^{\circ}\text{C}$  in isolierten Tankanlagen gespeichert. Das flüssige Erdgas wird über eine Verdampfeinheit geführt. Elektromagnetische Einblasventile bilden das Kernstück der sequentiellen Gaseinblasung. Diese Ventile werden direkt von der Motorelektronik gesteuert. Das Motormanagement erfasst zusätzliche Kenngrößen, wie z. B. Gasdruck und Gastemperatur im Gasverteiler.

Fahrzeuge mit Wasserstoffverbrennungsmotor (Fahrzeug-Nr. 27, 28)

Ausgeführte Wasserstoffmotoren in Kraftfahrzeugen werden in der Regel bivalent betrieben, d.h. sie sind nicht für den reinen Wasserstoffbetrieb optimiert. Da für Pkw zur Zeit keine verfügbaren Verbrauchs- und nur vereinzelte Emissionswerte (z.B. Abb. 7-20, Anhang) für optimierte Systeme in anerkannten Prüfzyklen zur Verfügung stehen, werden die Vor- und Nachteile der Wasserstoffverbrennung in Hubkolbenmotoren gegenüber der Benzinverbrennung in folgender Tab. 4-10 qualitativ dargestellt.

Tab. 4-10: Gegenüberstellung der Eigenschaften der Wasserstoffverbrennung in Kolbenmotoren im Vergleich zum Benzinbetrieb ([142], [216])

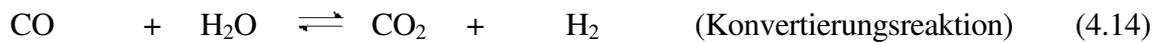
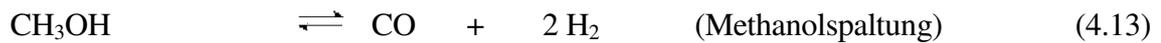
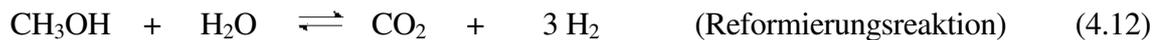
Vorteile des Wasserstoffmotors gegenüber Benzinmotoren	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• weite Zündgrenzen von (5-75% v/v) gegenüber Benzin (2-8% v/v)</li> <li>• homogene Durchmischung mit Luft</li> <li>• gleichmäßige Druckverteilung im Zylinder</li> <li>• höherer thermischer Wirkungsgrad durch extremen Magerbetrieb möglich</li> <li>• günstige Kaltstarteigenschaften, da wegen der verbesserten Gemischbildung auf eine Anfettung weitestgehend verzichtet werden kann</li> <li>• keine Verdünnung des Öls</li> <li>• geringe Säurebildung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• heftigere Verbrennung, höhere Materialbeanspruchung</li> <li>• schlechte Schmierungseigenschaften</li> <li>• Leistungsminderung durch niedrigen Gemischheizwert</li> <li>• Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses zur Leistungssteigerung führt unter Volllast zur Selbstzündung des Gemisches und sehr hohe Verbrennungsgeschwindigkeiten zu einem Flammenrückschlag in den Ansaugtrakt</li> <li>• Konstruktive Maßnahmen zur Unterdrückung der Selbstzündung des Gemisches erforderlich (z.B. besondere Zündmodule, AGR, Wasser- oder tiefkalte Wasserstoffeinspritzung in das Saugrohr)</li> <li>• Besonderheiten bei Flüssigwasserstoff:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Höhere Einspritzdrücke müssen durch eine Pumpe erzeugt werden, Anfälligkeit gegen Kavitation</li> <li>- Pumpe außerhalb des Kraftstofftanks führt zu Wärmetransport und Verdunstung</li> </ul> </li> </ul>

#### Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb ohne/mit Reformer (Fahrzeug-Nr. 24-26, 29, 30)

Die Brennstoffzelle ist eine Vorrichtung zur direkten Umsetzung chemischer Energie in elektrischen Strom. Sie besteht aus einer Sauerstoffelektrode (Kathode) und einer Brennstoffelektrode (Anode), die durch einen Elektrolyten miteinander verbunden sind. Die gasdurchlässigen Elektroden sind außerhalb der Zellen durch Metall-Leiter gekoppelt, in denen der Ladungstransport durch Elektronen erfolgt. In der Zelle findet der Ladungsaustausch zwischen der Anode und der Kathode durch Ionentransport statt. Diese Ionen bewegen sich durch den Elektrolyten, wobei dieser die Erscheinungsform der Ionen und deren Bewegungsrichtung bestimmt. Wegen der hohen elektrischen Aktivität von Wasserstoff im Vergleich zu anderen oxidierbaren Stoffen wird in der Praxis fast ausschließlich Wasserstoff als Brennstoff verwendet.

Da herkömmliche Wasserstoffspeicher deutliche Nachteile gegenüber den heutigen Kraftstoffen bezüglich Energiedichte und Handhabung besitzen, bietet sich die Möglichkeit an, ein Methanol/Wasser-Gemisch zu verwenden, das im Fahrzeug durch Reformierung in ein wasserstoffreiches Gas umgewandelt wird.

Das für den Betrieb des Reformers notwendige Mischungsverhältnis von Wasser zu Methanol liegt bei 1,3:1. Die heterogen katalysierte Reformierung des überhitzten Gemisches zu einem wasserstoffreichen Synthesegas wird bei Drücken bis 5 bar und Temperaturen von 150° bis 300° C durchgeführt. Neben der Reformierungsreaktion kommt es auch zur Methanolsplaltung, wobei Kohlenmonoxid entsteht. Durch die gleichzeitig ablaufende Konvertierungsreaktion wird Kohlenmonoxid zu CO<sub>2</sub> oxidiert.



Der Wärmebedarf der Reformierung wird durch einen katalytischen Brenner gedeckt, der während der Anfahrphase mit Methanol/Wasser-Gemisch und während der Betriebsphase mit dem wasserstoffhaltigen Anodenabgas der Brennstoffzelle betrieben wird. Das wasserstoffreiche Synthesegas muss gereinigt werden, da die für den Einsatz in Kraftfahrzeugen in Frage kommende Polymermembran-Brennstoffzelle (PEM-BZ) eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Kohlenmonoxid im Brenngas (Anforderung < 100 ppm) aufweist. Die PEM-BZ wird bei Temperaturen bis 100° C (373 K) betrieben.

#### Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb (Fahrzeug-Nr. 31)

Neben den günstigen Wirkungsgraden elektrischer Maschinen sind für die Beurteilung des batteriebetriebenen Elektrostraßenfahrzeuges der Energiespeicher, die daraus resultierenden Gewichte und deren Kosten, sowie die gewichtsabhängigen Verbrauchswerte wesentlich. Die Kenngrößen der Batterien sind in Tab. 7-35 im Anhang zusammengefasst und orientieren sich an Entwicklungszielen (Tab. 7-36, Anhang).

#### 4.3.3.2 Fahrzeugvergleiche

Die Auslegung des Fahrzeuges wird bei der Modellierung besonders vom Antriebs- und Speichergewicht beeinflusst. Vereinfacht lässt sich für die Kleinwagenklasse sagen, dass jede Gewichtszunahme um 100 kg durch schwerere Speicher und Antriebe karosserie-seitig durch etwa 30 kg Gewichtserhöhung an der Rohkarosserie ausgeglichen werden muss, um gleichbleibenden Fahrwerkseigenschaften für Sicherheits- und Stabilitätsanforderungen durch eine angepasste Auslegung der Bremsen und Achsen zu genügen (Abb. 7-14, Anhang).

Die technischen Daten der untersuchten Antriebsvarianten sind in Tab. 4-11a bis Tab. 4-11c zusammengefasst. In Tab. 7-49 (Anhang) findet sich eine Übersicht mit dem Verzeichnis aller untersuchten Varianten.

Tab. 4-11a: Basisdaten der Antriebsvarianten für die Fahrzeugklasse ökologisch vertretbarer Kleinwagenklasse-Pkw im Jahr 2010

Lfd.-Nummer		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 <sup>1)</sup>	14 <sup>1)</sup>	15	16	17	18	19	
Fahrzeug-Nummer		1	2	3	4	5	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13	
Treibstoff-Nummer		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	10	
Abkürzung		Ref. VKM-Otto	Ref. VKM-Otto DI	Ref. VKM-EMVT	Ref. VKM-Start/Stopp	Ref. VKM-LLReifen	Ref. VKM-LLÖl	Ref. VKM-zin-DI	VKM-Ben-zin-DI	VKM-Ben-zin-DI	VKM-Benz Hubredl.ader	VKM-Benz Hubredl.ader	S-Hybrid-Benzin-DI	S-Hybrid-Benzin-DI	S-Hybrid-Be-Stirling	S-Hybrid-Be-Stirling	P-Hybrid-Benzin-DI	P-Hybrid-Benzin-DI	VKM-Diesel	VKM-Diesel	VKM-RME-DI
Treibstoff		Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Diesel	Diesel	RME
Abgasmindeststandard		EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4D	EURO 5	EURO 4D
<b>Motortyp</b>																					
Motor-/Stackleistung	<b>kW</b>	44	48	48	40	44	44	42	42	40	40	46	46	45	45	46	46	40	40	40	
Hubraum	<b>l</b>	1,4	1,4	1,4	1,3	1,4	1,4	0,9	0,9	0,4	0,4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
Elektromotorleistung	<b>kW</b>	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	55	55	45	45	17	17	-	-	-	
Leistung im Generatorbetrieb	<b>kW</b>	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	45	45	45	45	17	17	-	-	-	
Getriebe	<b>-</b>	5G M	5G M	5G M	5G M	5G M	5G M	6G A	6G A	5G M	5G M	1G	1G	1G	1G	6G A	6G A	6G A	6G A	6G A	
Max. Leistung (elektrisch)	<b>kW</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80	80	50	50	45	45	-	-	-	
<b>Fahreigenschaften</b>																					
Beschleunigung 0-100 km/h	<b>s</b>	17	19	16	16	17	17	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	
Höchstgeschwindigkeit	<b>km/h</b>	152	161	170	152	152	152	160	160	140	140	160	160	160	160	160	160	160	160	160	
Reichweite im NEFZ	<b>km</b>	750	750	750	750	750	750	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	
<b>Gesamtgewichte</b>																					
Antriebsstrang	<b>kg</b>	236	234	228	249	234	234	196	201	133	138	377	381	345	345	269	275	212	218	214	
Fahrzeug ohne Antrieb	<b>kg</b>	716	716	716	716	716	716	433	433	433	433	480	480	460	460	445	445	433	433	433	
Gesamt	<b>kg</b>	953	951	945	965	951	951	629	633	566	570	857	861	805	805	714	720	644	650	647	
<b>Speicher</b>																					
Tankinhalt (berechnet)	<b>Liter</b>	46	39	35	45	44	44	19	19	18	18	23	23	16	16	19	19	17	16	19	
Tankinhalt	<b>MJ</b>	1490	1265	1139	1434	1420	1413	623	623	567	567	744	744	508	508	607	607	607	577	610	
Traktionsbatterie	<b>kWh</b>	-	-	-	0,7	-	-	-	-	-	-	6,5	6,5	3,2	3,2	3,2	3,2	-	-	-	

<sup>1)</sup> wegen unzureichender umweltbezogener Gesamtdaten erfolgt keine Endauswertung für dieses Fahrzeug

Tab. 4-11b: Basisdaten der Antriebsvarianten für die Fahrzeugklasse ökologisch vertretbarer Kleinwagenklasse-Pkw im Jahr 2010

Lfd.-Nummer		20	21	22	23 <sup>1)</sup>	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
<b>Fahrzeug-Nummer</b>		13	14	14	15	16	16	17	17	18	18	19	19	20	20	21	21	22	22	23
<b>Treibstoff-Nummer</b>		10	8	8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	4	4	9	9	7a
<b>Abkürzung</b>		DI	VKM-RME-DME-DI	VKM-DME-DI	VKM-sel-SDI	S-Hybrid-Diesel	S-Hybrid-Diesel	S-Hybrid-Diesel	S-Hybrid-Diesel	S-Hybrid-Diesel	P-Hybrid-Diesel	P-Hybrid-Diesel	P-Hybrid-Diesel	VKM-CNG	VKM-CNG	VKM-LNG	VKM-LNG	VKM-EtOH	VKM-EtOH	VKM-Me-thanol
<b>Treibstoff</b>		RME	DME	DME	Diesel 1 L Auto	Diesel	CNG	CNG	LNG	LNG	BioEtOH	BioEtOH	MeOH							
<b>Abgasmindeststandard</b>		EURO 5	EURO 4D	EURO 5	EURO 4D	EURO 4D	EURO 5	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B						
<b>Motortyp</b>																				
Motor-/Stackleistung	<b>kW</b>	40	40	40	11	44	44	42	42	44	44	40	40	42	42	42	42	42	42	42
Hubraum	<b>l</b>	1,0	1,0	1,0	0,4	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Elektromotorleistung	<b>kW</b>	-	-	-	-	55	55	45	45	17	17	15	15	-	-	-	-	-	-	-
Leistung im Generatorbetrieb	<b>kW</b>	-	-	-	-	45	45	42	42	17	17	15	15	-	-	-	-	-	-	-
Getriebe		6G A	6G A	6G A	6G A	1G	1G	1G	1G	6G A	6G A	6G A	6G A	6G A	6G A	6G A	6G A	6G A	6G A	6G A
Max. Leistung (elektrisch)	<b>KW</b>	-	-	-	-	80	80	50	50	45	45	15	15	-	-	-	-	-	-	-
<b>Fahreigenschaften</b>																				
Beschleunigung 0-100 km/h	<b>s</b>	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Höchstgeschwindigkeit	<b>km/h</b>	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160
Reichweite im NEFZ	<b>km</b>	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
<b>Gesamtgewichte</b>																				
Antriebsstrang	<b>kg</b>	220	236	241	k.A.	390	396	316	323	288	295	259	266	253	257	207	211	205	209	214
Fahrzeug ohne Antrieb	<b>kg</b>	433	433	433	k.A.	480	480	462	462	445	445	445	445	445	445	445	445	433	433	433
Gesamt	<b>kg</b>	653	668	673	400	870	877	779	785	733	739	704	711	698	702	651	656	637	642	647
<b>Speicher</b>																				
Tankinhalt (berechnet)	<b>Liter</b>	18	32	31	5	21	20	15	15	16	16	14	14	84	84	23	23	29	29	40
Tankinhalt	<b>MJ</b>	580	604	573	192	739	702	542	515	581	552	504	480	689	689	653	653	618	618	625
Traktionsbatterie	<b>kWh</b>	-	-	-	-	6,2	6,2	3,2	3,2	3,2	3,2	2,4	2,4	-	-	-	-	-	-	-

<sup>1)</sup> wegen unzureichender umweltbezogener Gesamtdaten erfolgt keine Endauswertung für dieses Fahrzeug



#### 4.3.3.3 Verbrauchswerte von Pkw

Die Dimensionierung der untersuchten Pkw mit alternativen Antrieben und deren Verbrauchswerte werden modelliert und anhand von Fachveröffentlichungen überprüft (z.B. [75], [278]). Die verwendeten Datengrundlagen sind im Anhang in Tab. 7-30 dokumentiert.

Zunächst wird das Fahrzeuggewicht in Abhängigkeit von der Fahrzeuggröße und der Antriebsleistung modelliert. Die wesentliche Einflussgröße auf den Verbrauch ist das Fahrzeuggewicht, das vom Antriebs- und Speichergewicht abhängt. In einem iterativen Prozess wird über den mechanischen Energiebedarf der untersuchten Fahrzeuge (Abb. 7-10 bis Abb. 7-12, Anhang) und den durchschnittlichen Wirkungsgraden im Fahrzyklus der Fahrzeugverbrauch errechnet. Da die Anforderungen an die Reichweite eine feste Größe darstellen und das Speichergewicht vom Fahrzeugverbrauch abhängt, wird der mechanische Energiebedarf, der Verbrauch und das Speichergewicht erneut angepasst. Die Ergebnisse im NEFZ stimmen mit Untersuchungen in [278] überein.

Die Eingangsdaten des Modells zu den Fahrzeugwirkungsgraden im Zyklus, den ermittelten Verbrauchswerte und den CO<sub>2</sub>-Emissionen am Fahrzeug sind in Tab. 7-37 im Anhang zusammengefasst. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein hoher Wirkungsgrad nicht zwangsläufig mit einem niedrigen Verbrauch verbunden ist, sofern sich die Fahrzeuggewichte unterscheiden. Weitere geringfügig abweichende Gewichte sind auf die Modellierung höherer Gewichte durch gestiegene Anforderungen an das Abgasnachbehandlungssystem zurückzuführen.

#### 4.3.3.4 Referenzfahrzeug

Bei dem gewählten Referenzfahrzeug handelt es sich um einen europäischen Kleinwagen, der hinsichtlich Leistung und Komfort mindestens den heute üblichen Standard erreicht. Ähnlich wie die zukünftigen Fahrzeuge sollen mit dem Fahrzeug bis zu fünf Personen transportiert werden können und eine Nutzlast von 400 kg aufweisen. Um sicherzustellen, dass das ausgewählte Referenzkonzept die am Markt verfügbaren Fahrzeuge repräsentiert, wird durch eine Gegenüberstellung vorhandener Messungen ein realitätsnahes Referenzfahrzeug ermittelt. Der Vergleich der veröffentlichten Daten mit den berechneten Ergebnissen ist in Tab. 7-38 im Anhang zusammengefasst.

#### 4.3.3.5 Limitierte Schadstoffe von Pkw

In Tab. 4-5 ist die grundlegende Matrix für die Abgasmindeststandards dargestellt. Unter den limitierten Schadstoffen versteht man die durch Vorschriften begrenzten Schadstoffe (CO, HC, NO<sub>x</sub>, Partikel), die bei Pkw nach EG-Richtlinie 70/220/EG [1], in der Fassung der Richtlinie 98/69/EG [6] für Fahrzeuge der Grenzwertstufen EURO 3 und EURO 4 gelten. Da für Benzin- und Diesel-Pkw unterschiedliche Grenzwertanforderungen gelten, werden in dieser Arbeit die

Begriffe **EURO 4B** für den Standard der Benzin-Pkw und **EURO 4D** für den Standard der Diesel-Pkw verwendet.

#### Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschinen

Die in dem erstellten Modell verwendeten Emissionsfaktoren für verschiedene Fahrzyklen werden aus folgenden Datenquellen miteinander verglichen und – sofern erforderlich – angepasst:

- Feldüberwachungsprojekte ([210], [211], [212], [213]),
- Typprüfdaten des Kraftfahrt-Bundesamtes ([145], [146]),
- „Handbuch für Emissionsfaktoren, HBEFA“ [137],
- relative Minderungsfaktoren im Vergleich zur Basis- oder Vergleichsmotorisierungen für DME ([24], [122]), RME [213], Erdgas [46], Methanol [170] und Ethanol [122].

Eine über die bekannten Grenzwertanforderungen von EURO 4 nach Richtlinie 98/69/EG hinausgehende Emissionsminderung wird für Ottomotoren ([154], [176]) als **SULEV Standard** und für Dieselmotoren ([16], [36], [204], [243]) als **EURO 5 Standard** ebenfalls abgeleitet. Die Konzepte werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

#### Benzin EURO 4 Abgasstandard (EURO 4B)

Durch die steuerliche Förderung einer frühzeitigen Einführung zukünftiger Emissionsstandards in Deutschland und anderen Mitgliedstaaten der EU entspricht der Abgasstandard EURO 4 gemäß 98/69/EG für Benzinfahrzeuge bereits seit Ende der 90er Jahre dem Stand der Technik. Während man anfangs noch davon ausging, dass die Standards grundsätzlich nur durch verhältnismäßig aufwändige Systeme (z.B. elektrisch beheizte Katalysatoren, Sekundärluftsysteme) zu erreichen wären [237], zeigte sich schon bald, dass die Verwendung von motornahen Katalysatoren, verbesserten Isolierungen des Abgasstranges und zusätzlicher Abgassonden in Kombination mit einer Optimierung der Warmlaufeigenschaften des Motors in der Regel ausreichen, um die Standards auch über die gesamte Lebensdauer einzuhalten ([211], [212]).

Für die Ermittlung der limitierten Emissionen zukünftige Fahrzeugkonzepte werden zwei prinzipielle Verfahren gewählt.

- (1) Falls keine Messwerte für neuen Technologien vorliegen, werden für die Emissionen Standardemissionswerte verwendet, wie sie für den untersuchten Mindeststandard (z.B. EURO 4B) typisch sind. Darüber hinausgehende Potentiale werden durch zusätzliche Minderungsfaktoren einbezogen (z.B. SULEV Standard).
- (2) Sofern bereits Messwerte für die neuen Technologien vorliegen, werden diese verwendet und anhand der vorliegenden Daten Minderungsfaktoren abgeleitet.

Das Prinzip der Gegenüberstellung und Ableitung der Emissionsfaktoren am Beispiel der Ottomotoren der Grenzwertstufe EURO 4B im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) kann Abb. 7-15 im Anhang entnommen werden.

Für die Verwendung alternativer Treibstoffe wird das Prinzip am Beispiel von Erdgas im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) in Abb. 7-16 (Anhang) erläutert. Ein Beispiel für die Ableitung von Minderungsfaktoren von Pkw mit Methanolverbrennungsmotor wird in Abb. 7-17 und

Abb. 7-18 im Anhang gezeigt. Die Datengrundlage für die Festlegung der Emissionswerte zukünftiger Fahrzeugkonzepte ist deutlich kleiner, als für die Festlegung der EURO 4-Werte von Ottomotoren.

#### Super Ultra Low Emission Abgasstandard (SULEV) für Verbrennungsmotoren

Der SULEV Standard wurde in Kalifornien eingeführt, um durch eine schrittweise Senkung von Flottenemissionsstandards die durch den Verkehr verursachte Immissionsbelastung zu reduzieren. Obwohl in Europa die Reduktion der Abgasemissionen auf das Niveau von Benzinfahrzeugen mit der Grenzwertstufe EURO 4B wahrscheinlich ausreichen wird, um die Luftqualitätsziele zu erreichen (Kapitel 2.2.3), ist es technisch möglich, die Anforderungen um eine weitere Größenordnung zu unterbieten. In der Praxis können diese niedrigen Emissionen durch Verbrennungsmotoren erreicht werden, die mit konventionellen Treibstoffen und mit stöchiometrischem Gemisch betrieben werden. Nach bisherigem Kenntnisstand werden Dieselantriebe die hohen Anforderungen des SULEV Standards nicht einhalten können. Dies liegt an den hohen Rohemissionen an Stickstoffoxiden durch ihren extrem abgemagerten Betrieb und an den Rußpartikelemissionen.

Technisch bedeutet die Erreichung des SULEV Grenzwertes für Ottomotoren, dass die Reduktion der Rohemissionen des Motors in allen Betriebszuständen von 96% auf 99,8% ansteigen muss [84]. Die technischen Lösungen sehen Komponenten und Verfahren zur Verbesserung des Kaltstarts vor [34]. Zu den Systemkomponenten und Maßnahmen zur Verringerung der Kaltstartemissionen zählen z.B.:

- Spätzündung, erhöhte Leerlaufdrehzahl,
- Bypassventilöffnung des Abgasturboladers (Wastegate),
- Sekundärlufteinblasung,
- motornahe Katalysatoren,
- HC-Fallen,
- elektrisch beheizbare Katalysatoren,
- Latentwärmespeichersysteme,
- Brennersysteme,
- „Niedrig-Light-Off“-Katalysatoren,
- „Exhaust-Gas-Ignition“ (EGI) und
- „Bypass“-Katalysatoren.

Das maximale Verbesserungspotential ist somit durch eine Kombination von verschiedenen Technologien im Zusammenspiel mit niedrigen Rohemissionen des Motors und einer intelligenten Regelungsstrategie in den verschiedenen Betriebszuständen möglich. Ein Beispiel eines solchen SULEV-Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor stellt das Honda „Zero Level Emission Vehicle“ dar, bei dem neben einem motornahen Katalysator mit optimierter Beschichtung eine HC-Falle und nachgeschaltet ein elektrisch beheizter Katalysator verwendet werden. Detaillierte Konzeptbeschreibungen zur Erreichung der Zielvorgaben, die etwa bei  $\frac{1}{10}$  des EURO 4 Grenzwertes liegen, finden sich in ([109], [148], [176], [244], [286]). Ein SULEV Abgasminderungskonzept für ein Fahrzeug der Volkswagen AG ist in [286] beschrieben und wird in Abb. 4-4 gezeigt.

Ausgehend von den bisher vorliegenden Ergebnissen der genannten Veröffentlichungen, werden aus den spezifischen Anforderungen der SULEV Grenzwertvorgaben Minderungsfaktoren für den neuen europäischen Fahrzyklus abgeleitet. Eine Gegenüberstellung der Minderungsfaktoren zur Festlegung von Emissionsfaktoren für limitierte Schadstoffemissionen findet sich in Abb. 7-19 (Anhang).

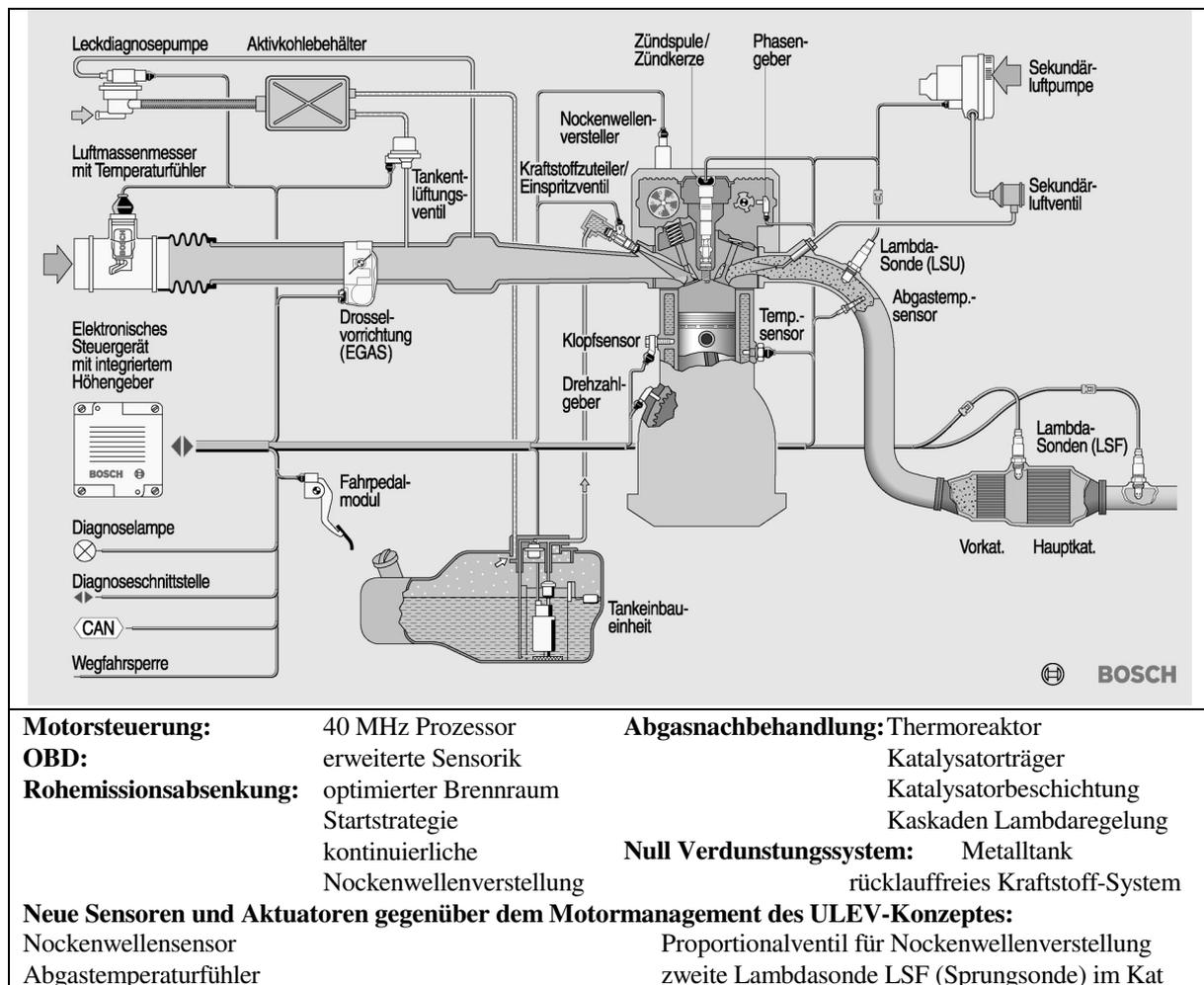


Abb. 4-4: Motormanagement, sowie motor- und abgasseitige Komponenten eines SULEV-Pkw [286]

### SULEV und Zero Emission Standard (ZEV) für Brennstoffzellen

Brennstoffzellenfahrzeuge im Methanolbetrieb werden als SULEV-Fahrzeug bilanziert. Die vorliegenden Daten der Abgasemissionen von Reformereinheiten und Katalytbrennern basieren jedoch allenfalls auf Laboruntersuchungen. Die Daten der Direktmethanolbrennstoffzelle basieren auf Schätzungen. So können allenfalls Minderungsfaktoren gegenüber fortschrittlichen Benzinantrieben in Ansatz gebracht werden. Brennstoffzellenfahrzeuge im Wasserstoffbetrieb werden als Nullemissionsfahrzeuge (ZEV) bilanziert.

SULEV Standard mit NO<sub>x</sub>-Einschränkung (SULEV+NO<sub>x</sub>) für Wasserstoffverbrennungsmotoren

Für Wasserstofffahrzeuge liegen keine Daten vor, die belegen, dass Verbrennungsmotoren das Potential besitzen, den SULEV Standard ohne aufwändige Abgasnachbehandlung einzuhalten. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, entweder bei der Fahrzeugauslegung eine zusätzlichen Abgasnachbehandlung zu berücksichtigen, oder Einschränkungen hinsichtlich der Abgasqualität hinzunehmen. Daher werden Wasserstofffahrzeuge aus den Randbedingungen in Abb. 7-20 (Anhang) als SULEV-Konzept bilanziert, das Einschränkungen hinsichtlich höherer NO<sub>x</sub>-Abgaswerte hinnehmen muss (SULEV + NO<sub>x</sub>). Auf zusätzliche aufwändige Abgasnachbehandlungen zur Einhaltung der NO<sub>x</sub>-Anforderungen des SULEV Grenzwertes, bei erhöhtem Verbrauch, kann dadurch verzichtet werden.

Diesel EURO 4 Abgasstandard (EURO 4D)

Anders als der Abgasstandard 98/69/EG für Benzinfahrzeuge, erfolgt die Einführung der Dieselstandards EURO 4D deutlich schleppender. Dies liegt daran, dass bei der Entwicklung der Dieselmotoren – anders als bei Ottomotoren – immer noch die Senkung der Rohgasemissionen der Verbrennung im Vordergrund aktueller Entwicklungen stehen. Folgende Maßnahmen wurden bei dem ersten Mittelklassefahrzeug umgesetzt, das die deutsche steuerrelevante Abgasnorm D4 (2005) einhält (74 kW Pumpe-Düse-Einspritzung mit Abgasturbolader) [284]:

- Optimiertes Hochdruckeinspritzsystem mit angehobenem Teillasteinspritzdruck und verbesserter Einspritzstrahlauslegung
- verbesserte Brennraumgeometrie mit reduzierten Ventiltaschen,
- Abgasrückführsystem mit kennfeldgeschaltetem Abgasrückführkühler und elektronischer Regelklappe und
- Oxidationskatalysator in Dünnwandtechnologie mit luftspaltisoliertem Vorrohr und optimierter Beschichtung.

Extrem hohe Einspritzdrücke des sog. Unit-Injector-Systems von bis zu ca. 2000 bar führen zu einer sehr feinen Kraftstoffverteilung im Brennraum. Durch eine Magnetventilsteuerung werden Einspritzmenge und Einspritzzeitpunkt genau definiert. Eine Kraftstoff-Voreinspritzung wird eingesetzt, um das Verbrennungsgeräusch des Direkteinspritzers zu reduzieren.

Ein Sonderfall ist der Betrieb mit RME als Treibstoff bezüglich der Abgasemissionen. Die Abgasemissionen fortschrittlicher Diesel-Pkw<sup>3</sup> im RME-Betrieb steigen bei NO<sub>x</sub> um etwa 45-65% an. Nachteilig wirkt sich dies bezüglich aus, dass ohne geeignete Abgasnachbehandlung der EURO 4 Grenzwert im Dieselbetrieb bereits nur knapp, im RME-Betrieb kaum eingehalten werden kann. Die Emissionen von Pkw im Diesel- und im RME-Betrieb mit der Grenzwertstufe EURO 4 sind in (Abb. 7-21, Anhang) zusammengefasst.

Die Partikelemissionen sinken um etwa 40% im RME-Betrieb gegenüber dem Diesel-Betrieb. Dies liegt vor allem an dem erhöhten Anteil organisch löslicher Partikelanteile, die vom Oxidationskatalysator umgesetzt werden. Diese Ergebnisse bestätigen die Untersuchungen früherer

---

<sup>3</sup> Pumpe-Düse-Einspritzung, Abgas-Turbolader mit variabler Turbinengeometrie, Ölkühler, Ladeluftkühler

Studien an Dieselmotoren mit Wirbelkammerkonzepten der Grenzwertstufe EURO 1 und EURO 2 ([250], [276]). Auch in aktuellen Untersuchungen an einem 1,9 l Motor mit Pumpe-Düse-Einspritzung und Abgasturbolader werden die grundlegenden Aussagen bestätigt [232]. Bei RME wurden eindeutig geringere gemittelte Schwärzungszahlen bei deutlich stärkeren Schwankungen ermittelt als bei Dieselmotoren. Die Mittelwerte der Schwärzungszahlen werden im RME-Betrieb mit 0,39 bis 0,72 und bei im Betrieb mit Dieselmotoren mit 0,86 bis 1,04 angegeben.

#### Diesel EURO 5 Abgasstandard (EURO 5)

Während die Reduktion der Abgasemissionen von Benzinfahrzeugen mit der Grenzwertstufe EURO 4B nach heutigem Kenntnisstand ausreichen wird, um die Luftqualitätsziele zu erreichen, liegen die Grenzwerte EURO 4D von Diesel-Pkw noch weit über den Grenzwerten für Otto-Pkw. Zukünftig ist daher eine Angleichung der Grenzwerte für Benzin- und Dieselfahrzeuge bei den für den Dieselmotor kritischen Schadstoffen, Stickstoffoxide und Partikel, notwendig. In [204] wurden erstmals konkrete Grenzwertvorstellungen veröffentlicht, die Basis für die Anforderungen an die Diesel-Emissionsminderungskonzepte sein sollen. Folgende wesentlichen Eckpunkte sind vorgesehen:

- Für Otto- und Diesel-Pkw wird ein gemeinsamer Grenzwert festgelegt.
- Die Grenzwerte für CO, HC und NO<sub>x</sub> orientieren sich am Standard EURO 4 für Otto-Pkw.
- Für direkteinspritzende Ottomotoren wird ein Partikelgrenzwert eingeführt.
- Zur Messung und Begrenzung der Partikelemission soll ein neues wirkungsorientiertes Verfahren verwendet werden. Die Messung der Partikelzahl ist ein aussichtsreiches Verfahren.
- Der Partikelgrenzwert orientiert sich an das durch Partikelfilter erreichbare Niveau. Begrenzung der Partikelzahl auf 10<sup>7</sup> bis 10<sup>8</sup> pro Kilometer in einem festzulegenden Messzyklus und unter Berücksichtigung der in der Praxis erreichbaren Messgenauigkeiten über das gesamte Spektrum der Partikelgrößenverteilung.

Darauf aufbauend wird in Tab. 4-12 ein Grenzwert EURO 5 von 3 mg/km vorgeschlagen, der 20% höhere Partikelemissionen zulassen würde, als dies in aktuellen Vorschlägen des Umweltbundesamtes (2,5 mg/km in [263]) vorgesehen ist.

Tab. 4-12: EG-Emissionsanforderungen und Vorschlag eines EURO 5 Grenzwertes

[g/km]		CO		HC		NO <sub>x</sub>		HC + NO <sub>x</sub>		Partikel	
		Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel
<b>EURO 1</b>	<b>7/92</b>	3,16		-		-		1,13		-	0,18
<b>EURO 2</b>	<b>1/96</b>	2,2	1,0	-	-	-	-	0,5	0,7	-	0,08
<b>EURO 3</b>	<b>1/00</b>	2,3	0,64	0,20	-	0,15	0,50	-	0,56	-	0,05
<b>EURO 4</b>	<b>1/05</b>	1,0	0,50	0,10	-	0,08	0,25	-	0,30	-	0,025
<b>E i g e n e r V o r s c h l a g</b>											
<b>EURO 5</b>	<b>2008</b>	1,0		0,10		0,08		-		0,003 <sup>1)</sup>	

<sup>1)</sup> Grenzwert im bestehenden gravimetrischen Messverfahren. Zum Vergleich: Fahrzeuge mit 10<sup>7</sup>-10<sup>8</sup> Partikel pro Kilometer erreichen im NEFZ 0,001 g/km. Der höhere Wert berücksichtigt die Festlegung für diese Arbeit, nach der Benzin-DI Fahrzeuge den Grenzwert ohne Partikelfilter erfüllen sollen (vgl. Anhang, Abb. 7-23).

Diese Abweichung ist darin begründet, dass die heute bekannten Konzepte der Benzin-Direkt-einspritzung ohne Abgasnachbehandlung oder ohne weitgehenden homogenen Betrieb den Partikelwert von 2,5 mg/km nur schwer oder gar nicht einhalten.

Zunächst wurde ein gravimetrischer Grenzwert festgelegt. Dennoch reicht eine Minderung der Partikelmasse aus lufthygienischer Sicht nicht aus, um auch die Partikelzahl effektiv und in gleichem Maß zu mindern. So kann z.B. heute bei gleicher Partikelzahl die Partikelmasse um den Faktor 6 variieren und ausgehend von derselben Partikelmasse die Partikelzahl um den Faktor 2, wie Vergleichsmessungen an Pkw zeigen [204].

In Abhängigkeit vom Grenzwertvorschlag EURO 5 werden in [Abb. 7-22](#) und [Abb. 7-23](#) (Anhang) die technischen Minderungsanforderungen abgeleitet.

Diese aus lufthygienischer Sicht gesetzten Anforderungen an die Diesel-Pkw bedeuten eine über die bestehenden Anforderungen der EURO 4-Gesetzgebung hinausgehende Minderung der Stickstoffoxidemissionen um 70-80% und um 80-90% für den RME-Betrieb, um die Grenzwertanforderungen dauerhaft zu erfüllen. Die Partikelemissionen müssen um 80-90% gemindert werden. Solche Minderungen sind aus heutiger Sicht selbst bei sehr niedrigen Rohgasemissionen nur durch eine Abgasnachbehandlung (z.B. SCR, Partikelfilter) erreichbar.

Die Beeinflussung der motorischen Verbrennung betrifft u.a. Maßnahmen, wie Hochdruckeinspritzung und einen gesteuerten Einspritzverlauf, ggf. mit Piloteinspritzung, eine gezielte Auslegung von Swirl und Tumble, Vier-Ventil-Technik und Turbolader mit variabler Geometrie und ermöglicht eine NO<sub>x</sub>-Reduktion um 20-30%. Die Abgasrückführung ist eine seit langem in verschiedenen Varianten eingesetzte Technik, die mit elektronischer Steuerung und als gekühlte Abgasrückführung optimiert wird und NO<sub>x</sub>-Minderungsraten um 20-50% erreicht. Die interessanteste Technik ist in diesem Zusammenhang die selektive katalytische Reduktion (SCR), da sie in geregelter Ausführung die höchsten Minderungsraten (70-90%) ermöglicht und da sie gleichzeitig gestattet, den Motor gegenüber der bisherigen Ausführung ohne SCR auf einen 3-6% günstigeren Kraftstoffverbrauch abzustimmen [89].

Für die notwendigen Minderungsraten der Partikelemissionen werden Partikelfiltersysteme, die Reduktionen von über 90% in der Praxis erreichen, erforderlich sein.

Zur Festlegung der Emissionsfaktoren wird für NO<sub>x</sub> gegenüber den Emissionen eines EURO 4 Diesel-Pkw im NEFZ eine durchschnittliche Emissionsminderung um 75% erforderlich (0,0625 g/km). Entwicklungen für Dieselmotoren zeigen, dass diese Lastenheftanforderung durch selektive katalytische Reduktion (SCR) oder kombinierte Partikel-NO<sub>x</sub>-Reduktions-Systeme (0,065-0,12 g/km, [229]) in Kombination mit Mehrventiltechnologie, gekühlter Abgasrückführung und Hochdruckeinspritzung erreichbar erscheint. Die Kombination der SCR mit einem NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator zur Optimierung der Kaltstarteigenschaften oder eine SCR-Regelung mit einem NO<sub>x</sub>-Sensor zur Erhöhung der NO<sub>x</sub>-Umsatzraten bei minimalem Ammoniak-schlupf könnten die erforderlichen Minderungsraten von bis zu 85% ermöglichen.

Für die Emission von Partikeln wird im NEFZ ein Emissionsfaktor von 1 mg/km verwendet. Dieser Wert ist nachweislich durch die Anwendung von Partikelfiltern erreichbar [16].

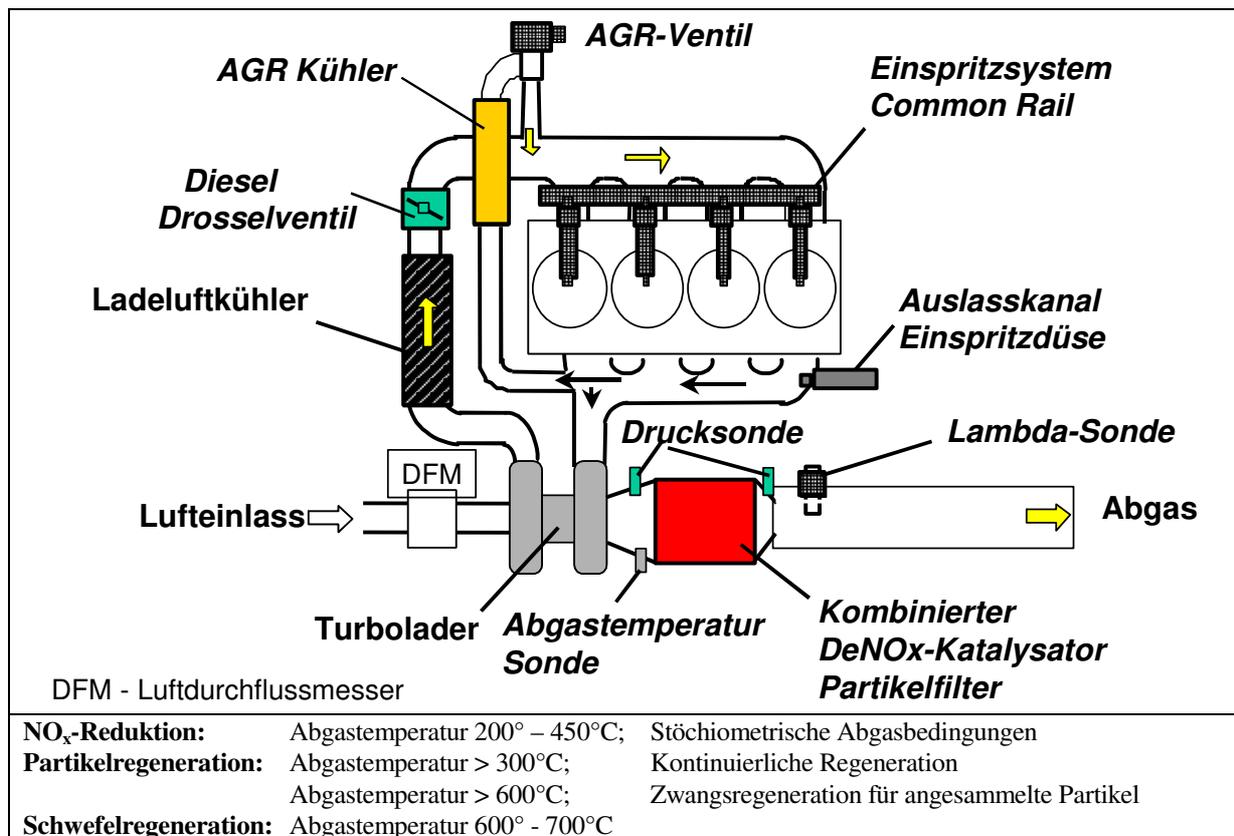


Abb. 4-5: Konzeptbeispiel für ein kombiniertes NO<sub>x</sub>-/Partikelreduktionssystem [230]

Ein Ausführungskonzept für den Grenzwert EURO 5 ist in Abb. 4-5 dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der kombinierte DeNO<sub>x</sub>-Katalysator/Partikelfilter zur Zeit noch nicht seine Dauerhaltbarkeit mit Emissionsminderungsraten von 75% für NO<sub>x</sub> unter Beweis gestellt hat.

#### 4.3.3.6 Nicht-Limitierte Schadstoffe von Pkw

Unter den nicht-limitierten Schadstoffkomponenten versteht man die Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs, die nicht durch EG-Richtlinien begrenzt sind. Hierzu gehören sowohl Schadstoffkomponenten (z.B. Benzol, Toluol, Xylol, Differenzierung der Partikelemissionen) als auch Klimagasemissionen (z.B. Methan, Distickstoffoxid) und Schwefeldioxid. Das Verfahren zur Ermittlung der Datengrundlagen für nicht-limitierte Emissionen wird ähnlich durchgeführt wie die Ermittlung der Daten der limitierten Emissionen. So mussten zum Beispiel N<sub>2</sub>O-Emissionen auf Grundlage vorhandener Messungen extrapoliert und hinsichtlich ihrer Plausibilität geschätzt werden (Abb. 7-24, Abb. 7-25, Anhang).

Darüber hinaus werden in Veröffentlichungen für nicht-limitierte Kohlenwasserstoffkomponenten prozentuale Massenanteile von den Gesamtkohlenwasserstoffen abgeleitet ([41], [116], [123], [124], [128], [275]), die entweder direkt in den Modellberechnungen dieser Arbeit oder in den verwendeten Datenbanken und Veröffentlichungen (z.B. [137], [122]) berücksichtigt wer-

den. Weitere Details der Ableitung prozentualer Anteilsfaktoren für die Kohlenwasserstoffemissionen von Benzin-, Diesel- und alternativen Antrieben, sowie der Emissionsfaktoren für  $\text{NH}_3$  und  $\text{SO}_2$  sind in Tab. 7-1 ( $\text{SO}_2$ ), in Tab. 7-39 (BTX,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ), in Tab. 7-40 ( $\text{CH}_4$ ), in Tab. 7-41 (Formaldehyd) und in Abb. 7-18 (Formaldehyd, Benzol,  $\text{CH}_4$ ), sowie in Abb. 7-26 ( $\text{NH}_3$ ) im Anhang dieser Arbeit zusammengefasst.

In Einzelfällen, besonders bei der Verwendung von alternativen Treibstoffen und bei der weiteren Fortschreibung der Grenzwertanforderungen in Richtung SULEV, mussten die Anteile nicht-limitierter Emissionen wegen fehlender Literaturdaten zunächst geschätzt werden. Dabei werden auch Messungen an einzelnen Fahrzeugen berücksichtigt, deren Ergebnisse dann auf Grundlage von Plausibilitätsprüfungen übertragen werden.

#### *4.3.3.7 Lärmmissionen von Pkw*

Für die Beurteilung der Lärmmissionen der Antriebsvarianten sind nicht nur die genormten spezifischen Fahrgeräusche nach EG-Richtlinie 92/97/EG [3] von Bedeutung, sondern gleichfalls das Geräuschniveau an hoch belasteten Straßen und die Berücksichtigung gewisser Fortschritte bei der Einführung lärmarmen Straßenbeläge und Reifen. Berechnungen in [261] gehen davon aus, dass in städtischen Regionen die Lärmmissionen um rund 2 dB(A) abnehmen werden. Wegen des anhaltenden Verkehrswachstums werden diese technischen Verbesserungen jedoch keinen Rückgang bei der Lärmbelastung nach sich ziehen. Auch von der aktuellen Richtlinie für Reifengeräusche [10] sind keine wesentlichen Reduktionen zu erwarten. Sie besitzt eher dahingehend Bedeutung, dass ein Messverfahren verbindlich festgelegt wurde, ein Einstieg in die Limitierung umgesetzt wurde und die Fortschreibung der Grenzwerte sichergestellt ist. Im Zwischenergebnis kann festgehalten werden, dass im Straßenverkehr die Lärmmissionen der Motoren soweit begrenzt sind, dass diese nicht mehr wesentlich zu den gesamten Lärmmissionen des Straßenverkehrs beitragen. Dadurch ist die Differenzierung der Ergebnisse zukünftiger Antriebe hinsichtlich ihrer Fahrgeräusche und Auswirkungen auf die Gesamtbelastung einer Straße im städtischen Raum gering.

Lärmarme Fahrbahndeckschichten haben ebenfalls ein bedeutendes Potential der Geräuscheminderung, können jedoch im Zuge der fahrzeugspezifischen Umweltverträglichkeits- und Kostenbewertung nicht berücksichtigt werden.

Die Entwicklung der bestehenden Lärmgrenzwerte für Straßenfahrzeuge ist in (Abb. 4-6) dargestellt.

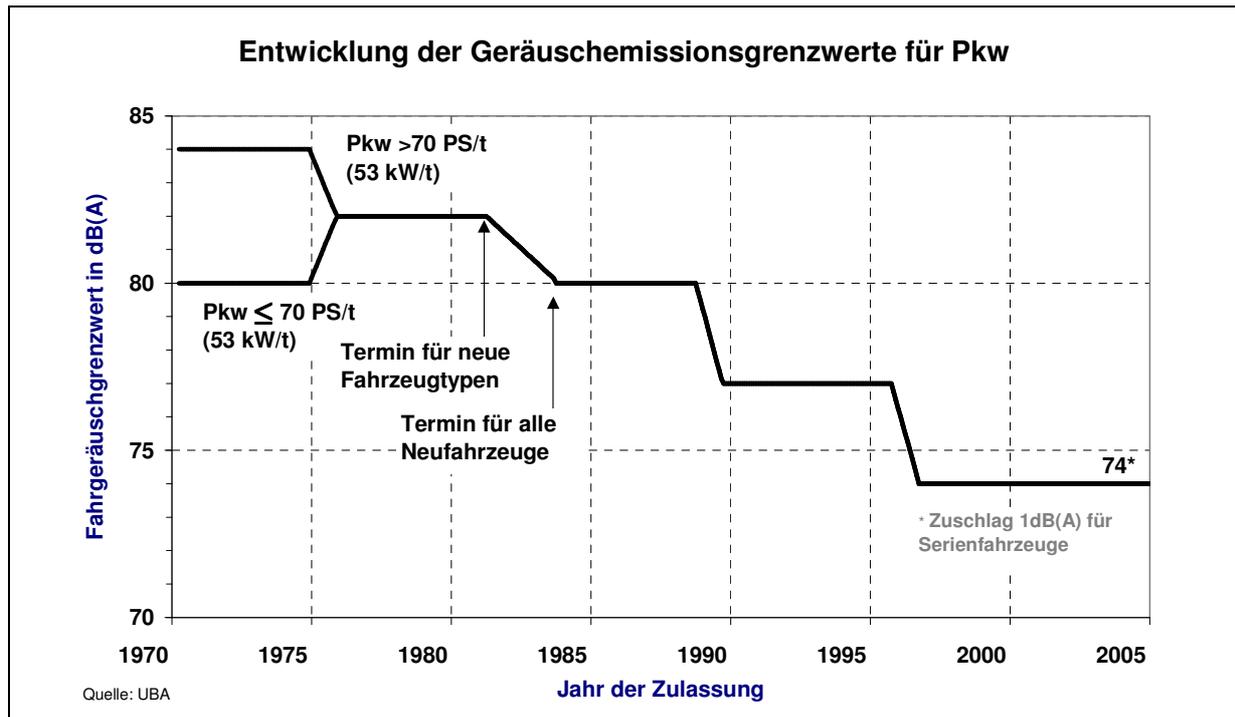


Abb. 4-6: EG-Lärmanforderungen für Pkw

Im Zuge dieser Arbeit werden Geräuschpegel für unterschiedliche Bewertungssituationen dargestellt, die die oben genannten grundlegenden Randbedingungen hinsichtlich einer weiteren Limitierung berücksichtigen und dabei

- auf vorhandenen Typprüfwerten des Kraftfahrt-Bundesamtes oder vorliegenden Messwerten (z.B. [63]) aufbauen, oder
- die Mittelungspegel in einem repräsentativen städtischen Straßenzug auf der Basis von Modellberechnungen berücksichtigen.

#### 4.3.3.8 Sonderausstattungsmerkmale

Unter Sonderausstattungen im Sinne dieser Arbeit werden Zusatzaggregate und Ausstattungsmerkmale verstanden, die nicht allein der Komfortsteigerung dienen, sondern wegen gesetzlicher Anforderungen notwendig sind.

##### Zusatzheizung

Die Notwendigkeit einer Heizung, besonders in Verbindung mit dem Freihalten der Scheiben von Beschlag und Eis ist in der StVZO § 35c gesetzlich geregelt. Demnach müssen geschlossene Führerräume in Kraftfahrzeugen mit einer durch die Bauart bestimmten Höchstgeschwindigkeit von mehr als 25 km/h ausreichend beheizt und belüftet werden.

Bei Verbrennungsmotoren fällt wegen des geringen Wirkungsgrades ausreichend Abwärme an, um die Beheizung der Fahrgastzelle zu ermöglichen. Motorkonzepte, die mit hohem Wirkungsgrad betrieben werden, müssen jedoch auch zusätzlich beheizt werden. Berechnungen wurden bisher in [63] und [236] vorgelegt. Die im Anhang in Tab. 7-42 zusammengefassten Emissionen

und Verbrauchswerte von Zusatzheizungen können im Modell mit den bilanzierten Fahrmissionen verknüpft werden.

### Klimaanlagen

Der Ausstattungsgrad mit Klimaanlagen hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen. Die EU-Kommission plant einerseits neue Schritte zur Minderung der zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Fahrbetrieb und andererseits eine Beschränkung der klimarelevanten Gase, die heute als Kühlmittel in Klimaanlagen eingesetzt werden. Gegenwärtig existieren keine Messvorschriften, wie diese komfortsteigernden Zusatzausrüstungen hinsichtlich ihres Zusatzverbrauches und auch ihrer Zusatzmissionen in der EG-Richtlinie 80/1268/EWG i.d.F. 1999/100/EG [9] zu überprüfen sind. Erste Ansätze hinsichtlich eines Messverfahrens wurden in [228] ausgearbeitet und werden ebenfalls in [262] weiter verfolgt. Darüber hinaus müssten auch mögliche Leckageverluste an teilfluorierten Kohlenwasserstoffen ermittelt und bewertet werden und alternative Klimatisierungsverfahren, z.B. durch die Verwendung von Kohlendioxid als Kältemittel, bewertet werden. Schätzungen gehen davon aus, dass allein die Leckageverluste des Kühlmittels HFKW R134a bei 120 g/Jahr liegen. Bei einer durchschnittlichen Fahrleistung und einem 1.300-fach höheren Treibhauspotential von R 134a ergeben sich zusätzliche CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen von 13 g<sub>CO2</sub>/km. Da zur Zeit zu wenig belastbare Daten zur Verfügung stehen, wird die Verwendung mobiler Klimaanlagen in dieser Arbeit noch nicht berücksichtigt.

#### 4.3.4 Herstellung der Fahrzeugkonzepte und Antriebe

Die Umweltwirkungen können unter Berücksichtigung der Aufwendungen zur Herstellung der Fahrzeuge und der Antriebe bilanziert werden. In der Herstellungsbilanz (Tab. 4-13) wird auf vorhandene Gesamtbilanzdaten aus einem Softwaresystem zur ganzheitlichen Bilanzierung (Modell GaBi 3.0-UBA, [134]) zurückgegriffen, die anhand von Daten aus [193] für Brennstoffzellenfahrzeuge ergänzt und auf Grundlage von Bauteildaten aus GaBi 3.0-UBA vereinfacht modelliert werden. Das Modell bietet sich an, da es modular aufgebaut ist und für Bauteile und Bauteilgruppen den Zugriff auf Sachbilanzdaten ermöglicht.

Tab. 4-13: Modellteil und Ergebnisse der Ermittlung der Umwelteigenschaften der Herstellung

Modellteil	Modelltyp
• Herstellungsbilanz	Umwelt
Eingangsdaten	Ergebnisdaten
• Gesamtbilanzdaten	• Sachbilanzen der Fahrzeuge und Antriebe (Herstellung)
• Bauteildaten	• Wirkungsbilanzen (Herstellung)

#### 4.3.4.1 Darstellung der wesentlichen Abgrenzungen

Im Zuge der Modellierungen erfolgt eine Unterscheidung hinsichtlich der Komponenten, die für das Fahrzeug ohne Antrieb in Frage kommen und die Komponenten, die den Antrieb und das Speichersystem betreffen (Abb. 4-7).

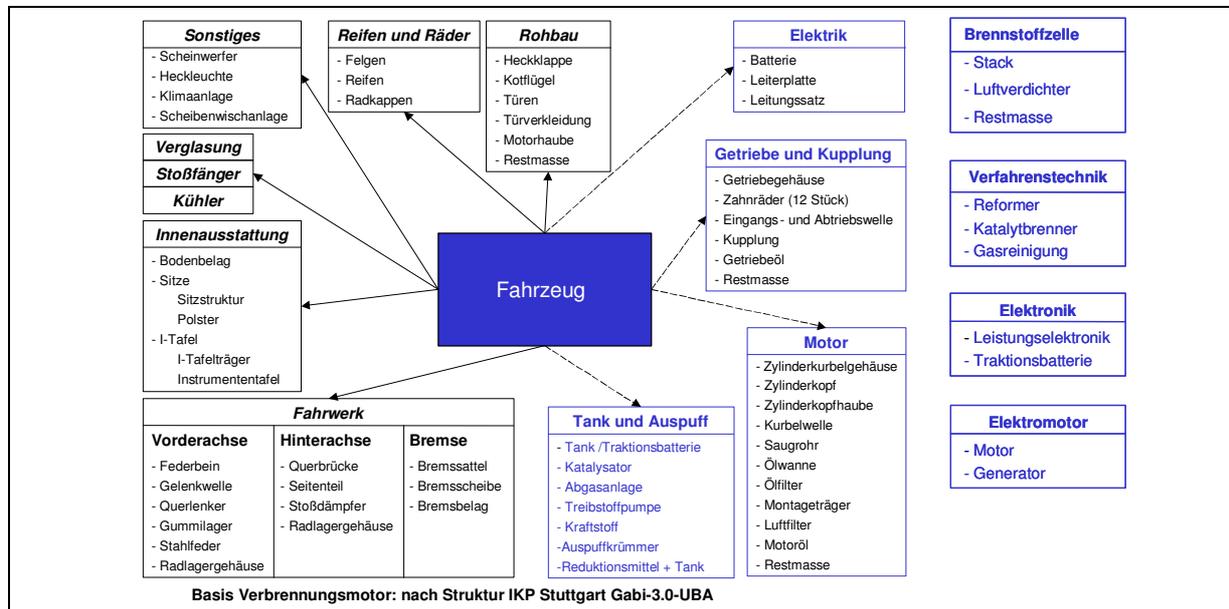


Abb. 4-7: Modellierung anhand des Aufbaus eines Pkw (nach [134], [135])

#### Fahrzeug ohne Antrieb

Grundsätzlich unterscheidet das Emissionsmodell Gabi 3.0-UBA zwischen zwei Karosserievarianten für die Bilanzierung der Aufwendung der Herstellung. Die Karosserie beinhaltet alle notwendigen Komponenten mit Ausnahme der antriebsrelevanten Komponenten und des Treibstoffspeichers. Es gibt eine Karosserie für eine Referenzvariante und eine Leichtbauvariante. Die im Zuge der Modellierung zur Ermittlung der Verbrauchswerte gestuften Gewichtsklassen (Kapitel 4.3.3.2 und Abb. 7-14, Anhang), die sich etwa aus höheren Gewichten für Fahrwerk und Bremsanlage ergeben, sofern die Antriebs- und Speichergewichte zunehmen, werden in der Verbrauchs- und Emissionsbilanz der Herstellung nicht gesondert ausgewiesen. Vielmehr ist zu erwarten, dass sich die Bilanzierung der gestuften Gewichtsklassen nicht signifikant auf das Gesamtergebnis auswirkt. Am Beispiel der Klimagasemissionen werden die Wirkungsbilanzergebnisse in der folgenden Abb. 4-8 dargestellt und mit vorhandenen Ergebnissen des 3-Liter Lupo der Volkswagen AG ([280], [193]) verglichen. Einschränkend können die CO<sub>2</sub>-Bilanzdaten des 3-Liter Lupo für das Fahrzeug ohne Antrieb nur als Summenwert angegeben werden. Die höheren Klimagasemissionen der Leichtbauvariante sind auf den verstärkten Einsatz neuer Werkstoffe (z.B. Aluminium, Magnesium) zurückzuführen.

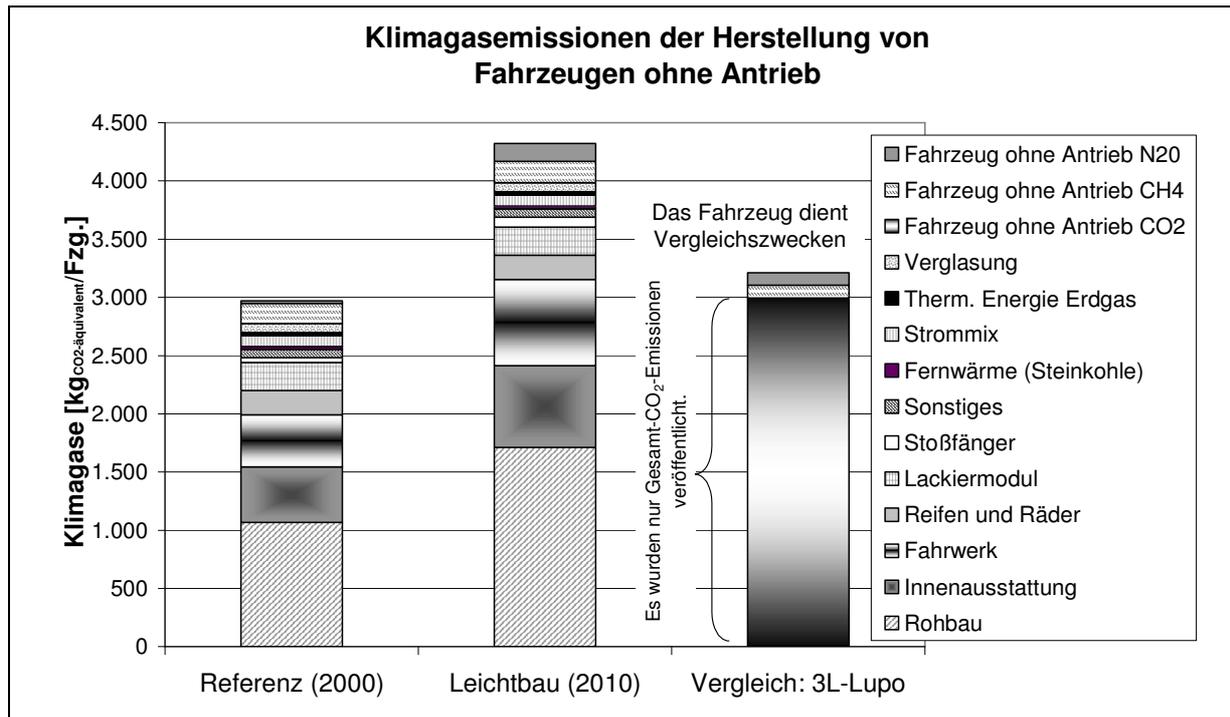


Abb. 4-8: Klimagasemissionen der Herstellung der Fahrzeuge ohne Antrieb (eigene Berechnungen nach [134], [135], [193], [280])

### Antriebe und Speicher

Die Bilanzierungen betreffen die unterschiedlichen Antriebsvarianten. Detaillierte Untersuchungen in ([134], [135]) zeigen, dass für Otto- und Dieselmotoren mit einem identischen Entwicklungsstand vergleichbare Umweltwirkungen zu erwarten sind. Sofern neue Werkstoffe eingesetzt werden, können sich Abweichungen in der Emissionsbilanz ergeben. Besonders Traktionsbatterien und Brennstoffzellen verursachen dadurch im Vergleich zu Verbrennungskraftmaschinen hohe Umweltwirkungen. Dies führt wiederum dazu, dass die verschiedenen Hybridvarianten unterschiedlich bewertet werden. Abb. 4-9 gibt beispielhaft einen Überblick über die Klimagasemissionen ausgewählter Antriebsvarianten.

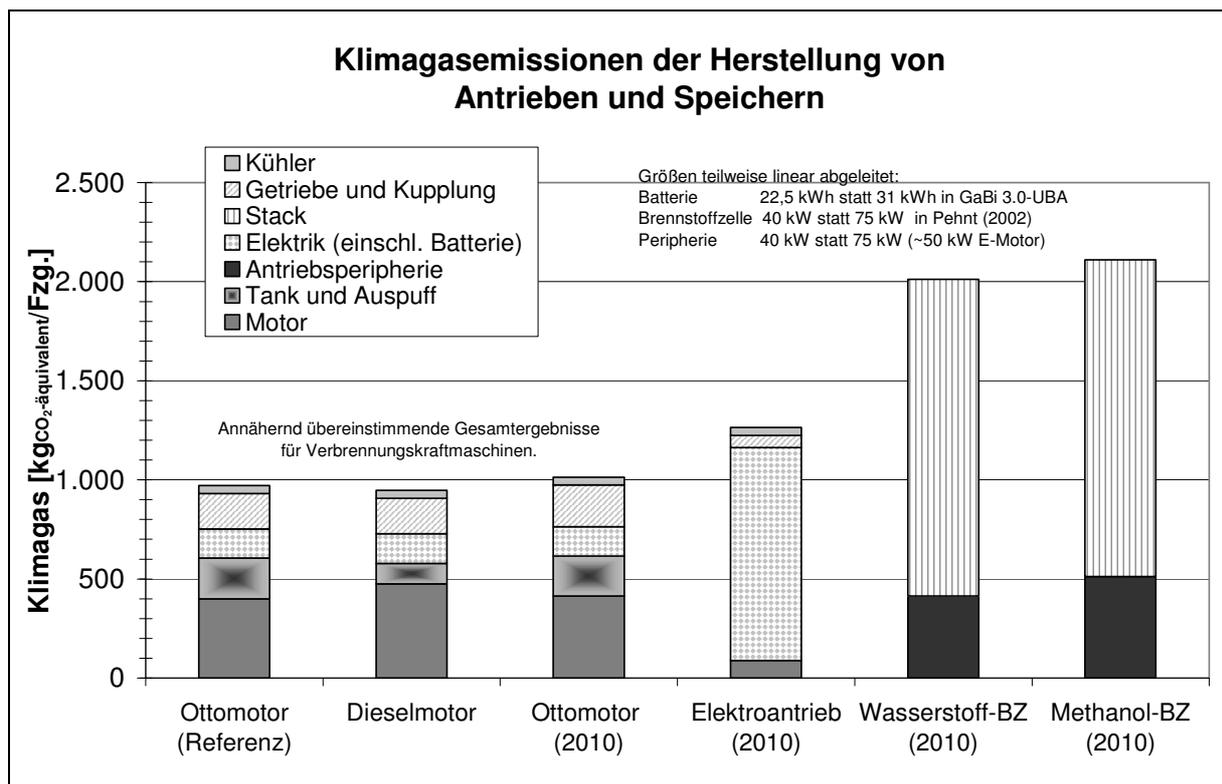


Abb. 4-9: Klimagasemissionen der Herstellung von Antrieben und Speichern (eigene Berechnungen nach [134], [135], [193])

Wegen der grundsätzlichen Übertragbarkeit der Emissionsbilanzen von Verbrennungskraftmaschinen werden identische Sachbilanzen für die Antriebe mit Benzin, Methanol und Ethanol, sowie Diesel, RME und DME berücksichtigt.

#### Abgasnachbehandlung

Problematisch ist aus heutiger Sicht die Bilanzierung der Abgasminderungssysteme für zukünftige Grenzwerte hinsichtlich des Herstellungsaufwandes. Optimierungen der Abgasemissionen von Ottomotoren werden nicht nur durch eine höhere Edelmetallbeladung der Katalysatoren, sondern auch durch weitere Maßnahmen zur Minderung der Rohgasemissionen erreicht (Abb. 4-4). Bilanzdaten für das Edelmetall Platin, das in seiner Gewinnung und Aufbereitung äußerst energieintensiv ist, sind weitgehend bekannt. Jedoch werden zunehmend weitere Edelmetalle, wie Rhodium und Palladium, an Stelle von und in Ergänzung zu Platin in Katalysatoren eingesetzt. Eine genaue Bilanzierung zukünftiger Konzepte ist somit nicht möglich. Dies gilt auch für zukünftige Dieselfahrzeuge der Stufe EURO 5, für die bisher nur wenig ausgeführte Beispiele vorhanden sind, um eine konkrete Sachbilanz von Abgasminderungssystemen zu erstellen. Eine exemplarische Gegenüberstellung der modellierten Klimagasemissionen ist in Abb. 4-10 dargestellt. Da noch nicht absehbar ist, welche Abgasnachbehandlungssysteme verwendet werden (z.B. SCR- oder DeNO<sub>x</sub>-Katalysatoren, Partikelfilter), können die Umweltbilanzen der Herstellung gegenwärtig nicht im Detail berechnet werden. Daher werden bei der Modellierung für diesen Fall zunächst relativ hohe Aufwendungen, besonders durch die Edelmetalle, wie für die Benzinfahrzeuge berücksichtigt, um mit dieser konservativen Schätzung eine Bewertung vorzunehmen.

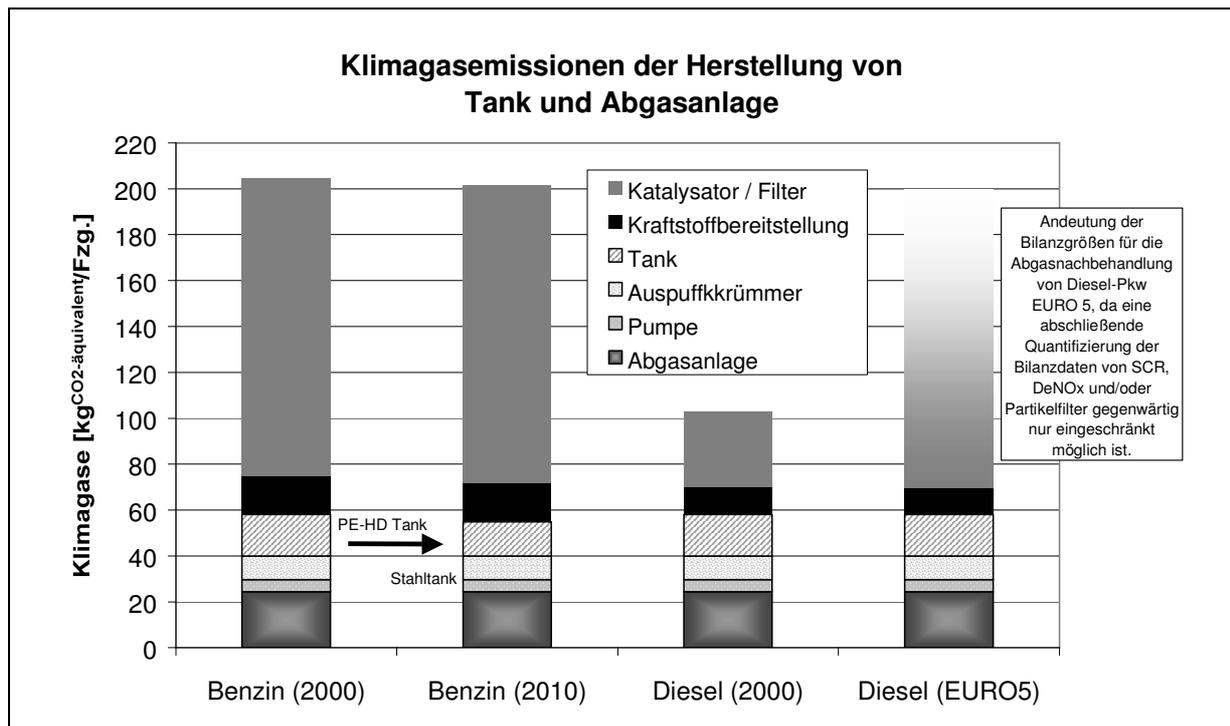


Abb. 4-10: Klimagasemissionen der Herstellung von Tank und Abgasanlagen (eigene Berechnungen nach [134], [135])

#### 4.3.4.2 Gegenüberstellung der Sachbilanzergebnisse

In Tab. 4-14 werden die Ergebnisse der Sachbilanzen für die Fahrzeuge ohne Antrieb und Speicher zusammengefasst, die im Zuge der Modellierung berücksichtigt werden. In Ergänzung zu den Sachbilanzdaten der Karosserie sind in den folgenden Tab. 4-15a-c die Sachbilanzdaten der Antriebe und Speicher zusammengefasst. Alle Ergebnisse dieser Arbeit werden auf eine Jahresfahrleistung von 12.000 km bezogen. Sie entspricht der in [83] veröffentlichten Pkw-Jahresfahrleistung für das Jahr 2000/2001. Die Lebensdauer der Fahrzeuge wird mit 10 Jahren berücksichtigt. In Tab. 7-49 findet sich eine Übersicht mit dem Verzeichnis aller untersuchten Varianten.

Tab. 4-14: Sachbilanzdaten der Herstellung der Pkw ohne Antriebe und Speicher (eigene Berechnungen nach [134], [135])

Laufleistung (km/Jahr)	12.000	Referenz Pkw (2003)	Pkw (2010)	Referenz-Pkw (2003)	Pkw (2010)
Lebensdauer (Jahre)	10	MJ/Fzg.	MJ/Fzg.	MJ/km	MJ/km
<b>Energieverbrauch</b>		73.616	97.517	613	813
<b>Global</b>		kg/Fzg.	kg/Fzg.	g/km	g/km
	CO <sub>2</sub>	3680,79	4875,87	30,7	40,6
	CH <sub>4</sub>	10,35	10,90	0,086	0,091
	N <sub>2</sub> O	0,14	0,74	0,001	0,006
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	53,11	250,24	0,443	2,085
	CO	16,63	25,97	0,139	0,216
	NO <sub>x</sub>	6,71	8,64	0,056	0,072
	NMHC	2,46	3,67	0,021	0,031
		g/Fzg.	g/Fzg.	mg/km	mg/km
	Partikel	1,04	1,04	0,009	0,009
	Staub	1790,06	2460,84	14,917	20,507
	NH <sub>3</sub>	19,95	27,50	0,166	0,229
	FormA	3,56	16,84	0,030	0,140
	Benzol	38,43	31,64	0,320	0,264
	BaP	0,48	0,38	0,004	0,003

Tab. 4-15a: Sachbilanzdaten der Herstellung der Antriebe und Speicher der Pkw

Lfd.-Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 <sup>1)</sup>	14 <sup>1)</sup>	15	16	17	18	19	
Fahrzeug-Nummer	1	2	3	4	5	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13	
Treibstoff-Nummer	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	10	
Abkürzung	Ref. VKM-Otto	Ref. VKM-Otto DI	Ref. VKM-EMVT	Ref. VKM-Start/Stopp	Ref. VKM-LLReifen	Ref. VKM-LLÖl	Ref. VKM-zin-DI	VKM-Ben-zin-DI	VKM-Ben-zin-DI	VKM-Benz Hubredlader	VKM-Benz Hubredlader	S-Hybrid-Benzin-DI	S-Hybrid-Benzin-DI	S-Hybrid-Ben-Stirling	P-Hybrid-Benzin-DI	P-Hybrid-Benzin-DI	VKM-Diesel	VKM-Diesel	VKM-RME-DI	
Treibstoff	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Diesel	Diesel	RME	
Abgasmindeststandard	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	EURO 4D	EURO 5	EURO 4D	
<b>Sachbilanz der Herstellung des Antriebes und der Speicher (alle Angaben je Fahrzeug)</b>																				
Energieverbrauch	GJ	18	18	18	20	18	18	17	17	17	17	23	23	k.A.	k.A.	22	22	16	18	16
<b>Globale Emissionen</b>																				
CO <sub>2</sub>	kg	904	904	904	983	904	904	854	854	854	854	1161	1161	k.A.	k.A.	1080	1080	810	904	810
CH <sub>4</sub>	kg	2,26	2,26	2,26	2,44	2,26	2,26	2,03	2,03	2,03	2,03	2,75	2,75	k.A.	k.A.	2,53	2,53	2,05	2,26	2,05
N <sub>2</sub> O	kg	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,25	0,25	0,25	0,25	0,29	0,29	k.A.	k.A.	0,27	0,27	0,06	0,06	0,06
<b>Emissionen in OK I+II+III</b>																				
SO <sub>2</sub>	kg	32,0	32,0	32,0	35,2	32,0	32,0	26,8	26,8	26,8	26,8	47,1	47,1	k.A.	k.A.	36,0	36,0	31,4	32,0	31,4
CO	kg	3,00	3,00	3,00	3,35	3,00	3,00	7,27	7,27	7,27	7,27	4,69	4,69	k.A.	k.A.	7,99	7,99	2,87	3,00	2,87
NO <sub>x</sub>	kg	2,03	2,03	2,03	2,16	2,03	2,03	1,82	1,82	1,82	1,82	2,43	2,43	k.A.	k.A.	2,20	2,20	1,59	2,03	1,59
NMHC	kg	0,72	0,72	0,72	0,79	0,72	0,72	0,66	0,66	0,66	0,66	1,05	1,05	k.A.	k.A.	0,88	0,88	0,69	0,72	0,69
Partikel	g	1,0	1,0	1,0	54,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	336	336	k.A.	k.A.	148	148	1,0	1,0	1,0
Staub	g	580	580	580	633	580	580	549	549	549	549	785	785	k.A.	k.A.	696	696	498	580	498
NH <sub>3</sub>	g	4,2	4,2	4,2	4,5	4,2	4,2	3,6	3,6	3,6	3,6	4,9	4,9	k.A.	k.A.	4,4	4,4	4,1	4,2	4,1
FormA	g	0,80	0,80	0,80	0,95	0,80	0,80	0,40	0,40	0,40	0,40	1,28	1,28	k.A.	k.A.	0,82	0,82	0,92	0,80	0,92
Benzol	g	7,87	7,87	7,87	8,37	7,87	7,87	8,48	8,48	8,48	8,48	10,53	10,53	k.A.	k.A.	9,86	9,86	6,33	7,87	6,33
BaP	g	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,14	0,14	k.A.	k.A.	0,13	0,13	0,09	0,10	0,09

<sup>1)</sup> wegen unzureichender umweltbezogener Gesamtdaten erfolgt keine Endauswertung für dieses Fahrzeug

Tab. 4-15b: Sachbilanzdaten der Herstellung der Antriebe und Speicher der Pkw

Lfd.-Nummer	20	21	22	23 <sup>1)</sup>	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
Fahrzeug-Nummer	13	14	14	15	16	16	17	17	18	18	19	19	20	20	21	21	22	22	23	
Treibstoff-Nummer	10	8	8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	4	4	9	9	7a	
Abkürzung	DI	VKM-RME-DME-DI	VKM-DME-DI	VKM-DME-DI	VKM-Diesel	S-Hybrid-Diesel	S-Hybrid-Diesel	S-Hybrid-Diesel	S-Hybrid-Diesel	P-Hybrid-Diesel	P-Hybrid-Diesel	P-Hybrid-Diesel	P-Hybrid-Diesel	VKM-CNG	VKM-CNG	VKM-LNG	VKM-EtOH	VKM-EtOH	VKM-Me-thanol	
Treibstoff	RME	DME	DME	Diesel 1 L Auto	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	CNG	CNG	LNG	LNG	BioEtOH	BioEtOH	MeOH	
Abgasmindeststandard	EURO 5	EURO 4D	EURO 5	EURO 4D	EURO 4D	EURO 5	EURO 4D	EURO 5	EURO 4D	EURO 5	EURO 5	EURO 5	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	
<b>Sachbilanz der Herstellung des Antriebes und der Speicher (alle Angaben je Fahrzeug)</b>																				
Energieverbrauch	GJ	18	16	18	k.A.	22	24	19	21	21	23	20	22	17	17	17	17	17	17	
<b>Globale Emissionen</b>																				
CO <sub>2</sub>	kg	904	810	904	k.A.	1104	1197	965	1059	1037	1130	990	1084	854	854	854	854	854	854	
CH <sub>4</sub>	kg	2,26	2,05	2,26	k.A.	2,73	2,95	2,44	2,65	2,55	2,76	2,45	2,66	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	
N <sub>2</sub> O	kg	0,06	0,06	0,06	k.A.	0,10	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	
<b>Emissionen in OK I+II+III</b>																				
SO <sub>2</sub>	kg	32,0	31,4	32,0	k.A.	51,1	51,7	45,4	46,0	40,6	41,2	38,7	39,3	26,8	26,8	26,8	26,8	26,8	26,8	
CO	kg	3,00	2,87	3,00	k.A.	0,28	0,41	0,15	0,29	3,59	3,73	3,49	3,63	7,27	7,27	7,27	7,27	7,27	7,27	
NO <sub>x</sub>	kg	2,03	1,59	2,03	k.A.	2,18	2,61	1,94	2,37	1,97	2,41	1,89	2,33	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	
NMHC	kg	0,72	0,69	0,72	k.A.	1,07	1,10	0,91	0,94	0,91	0,94	0,86	0,89	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	
Partikel	g	1,0	1,0	1,0	k.A.	327	327	244	244	148	148	119	119	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
Staub	g	580	498	580	k.A.	726	807	642	724	645	727	616	698	549	549	549	549	549	549	
NH <sub>3</sub>	g	4,2	4,1	4,2	k.A.	5,3	5,5	4,8	5,0	4,9	5,0	4,7	4,9	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	
FormA	g	0,80	0,92	0,80	k.A.	1,77	1,66	1,50	1,39	1,34	1,22	1,25	1,14	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	
Benzol	g	7,87	6,33	7,87	k.A.	8,30	9,84	7,54	9,08	7,71	9,25	7,44	8,98	8,48	8,48	8,48	8,48	8,48	8,48	
BaP	g	0,10	0,09	0,10	k.A.	0,12	0,13	0,11	0,12	0,10	0,12	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	

<sup>1)</sup> wegen unzureichender umweltbezogener Gesamtdaten erfolgt keine Endauswertung für dieses Fahrzeug

Tab. 4-15c: Sachbilanzdaten der Herstellung der Antriebe und Speicher der Pkw

<b>Lfd.-Nummer</b>		39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
<b>Fahrzeug-Nummer</b>		23	23	23	24	24	25	25	26	26	27	27	28	28	29	29	30	30	31
<b>Treibstoff-Nummer</b>		7a	7b	7b	7a	7b	7a	7b	7a	7b	5a	5b	6a	6b	5a	5b	6a	6b	11
<b>Abkürzung</b>		VKM-Methanol	VKM-Methanol	VKM-Methanol	S-Hybrid-Methanol-BZ	S-Hybrid-Methanol-BZ	BZ-Methanol	BZ-Methanol	DMBZ-Methanol	DMBZ-Methanol	VKM-CGH2	VKM-CGH2	VKM-LH2	VKM-LH2	BZ-CGH2	BZ-CGH2	BZ-LH2	BZ-LH2	ESF
<b>Treibstoff</b>		MeOH	BioMeOH	BioMeOH	MeOH	BioMeOH	MeOH	BioMeOH	MeOH	BioMeOH	CGH2-ZENT	CGH2-DE-Z	LH2-FOSSIL	LH2-REG	CGH2-ZENT	CGH2-DE-Z	LH2-FOSSIL	LH2-REG	Strommix
<b>Abgasmindeststandard</b>		SULEV	EURO 4B	SULEV	SULEV	SULEV	SULEV	SULEV	SULEV	SULEV	SULEV+NOx	SULEV+NOx	SULEV+NOx	SULEV+NOx	ZEV	ZEV	ZEV	ZEV	ZEV
<b>Sachbilanz der Herstellung des Antriebes und der Speicher (alle Angaben je Fahrzeug)</b>																			
Energieverbrauch	GJ	17	17	17	61	61	42	42	38	38	17	17	17	17	40	40	40	40	23
<b>Globale Emissionen</b>																			
CO <sub>2</sub>	kg	854	854	854	3048	3048	2109	2109	1983	1983	854	854	854	854	2012	2012	2012	2012	1171
CH <sub>4</sub>	kg	2,03	2,03	2,03	6,33	6,33	4,37	4,37	3,66	3,66	2,03	2,03	2,03	2,03	4,11	4,11	4,11	4,11	2,50
N <sub>2</sub> O	kg	0,25	0,25	0,25	0,28	0,28	0,19	0,19	0,22	0,22	0,25	0,25	0,25	0,25	0,19	0,19	0,19	0,19	0,13
<b>Emissionen in OK I+II+III</b>																			
SO <sub>2</sub>	kg	26,8	26,8	26,8	14,2	14,2	5,9	5,9	15,6	15,6	26,8	26,8	26,8	26,8	5,6	5,6	5,6	5,6	48,1
CO	kg	7,27	7,27	7,27	3,95	3,95	2,77	2,77	2,94	2,94	7,27	7,27	7,27	7,27	2,67	2,67	2,67	2,67	2,49
NO <sub>x</sub>	kg	1,82	1,82	1,82	5,54	5,54	3,84	3,84	3,45	3,45	1,82	1,82	1,82	1,82	3,47	3,47	3,47	3,47	1,99
NMHC	kg	0,66	0,66	0,66	1,56	1,56	1,01	1,01	1,03	1,03	0,66	0,66	0,66	0,66	0,96	0,96	0,96	0,96	1,28
Partikel	g	1,0	1,0	1,0	89,1	89,1	0,0	0,0	243	243	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	716
Staub	g	549	549	549	1262	1262	853	853	842	842	549	549	549	549	587	587	587	587	716
NH <sub>3</sub>	g	3,6	3,6	3,6	76,0	76,0	54,9	54,9	54,9	54,9	3,6	3,6	3,6	3,6	54,9	54,9	54,9	54,9	4,0
FormA	g	0,40	0,40	0,40	0,29	0,29	0,00	0,00	1,39	1,39	0,40	0,40	0,40	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	2,45
Benzol	g	8,48	8,48	8,48	6,54	6,54	4,16	4,16	4,18	4,18	8,48	8,48	8,48	8,48	3,68	3,68	3,68	3,68	6,54
BaP	g	0,11	0,11	0,11	0,08	0,08	0,05	0,05	0,06	0,06	0,11	0,11	0,11	0,11	0,04	0,04	0,04	0,04	0,09

### 4.3.5 Zusammenfassung der Umweltwirkungen

Abschließend werden in der Umweltbilanz des Modells alle Beiträge und Ergebnisse der umweltbezogenen Modellteile zusammengeführt, um die Gesamtergebnisse der Umweltbilanzen zu ermitteln (Tab. 4-16).

Tab. 4-16: Modellteil und Ergebnisse der Ermittlung der Umwelteigenschaften

Modellteil		Modelltyp
• Umweltbilanz (einschl. Ergebnisse zur Herstellungsbilanz und zum Verbrauch)		Umwelt
Eingangsdaten	Differenzierung nach	Ergebnisdaten
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbrauchswerte</li> <li>• Abgasemissionen</li> <li>• Stoffwerte</li> <li>• Treibstoffherstellung</li> <li>• Herstellungsbilanzen der Fahrzeuge und Antriebe</li> <li>• Äquivalenzfaktoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrzeugkonzepte               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Standard-Pkw</li> <li>- Leichtbau-Pkw</li> </ul> </li> <li>• Antriebskonzepte               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verbrennungskraftmaschinen</li> <li>- Hybridantriebe</li> <li>- Brennstoffzellen</li> <li>- Elektroantriebe</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sachbilanzen (Betrieb, Treibstoff)</li> <li>• Wirkungsbilanzen (Betrieb, Treibstoff, Herstellung)</li> <li>• Angaben zum Flächenverbrauch</li> <li>• Angaben zum Lärm</li> </ul>

Die Modellergebnisse werden im folgenden Kapitel 4.3.6 zusammengefasst und diskutiert.

### 4.3.6 Ergebnisse der Umweltwirkungen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der untersuchten Wirkungskategorien als Zwischenergebnisse der Gesamtbilanzierung der Kosten-Nutzen-Verhältnisse zusammengefasst. Zur Bewertung werden nur die Daten im neuen europäischen Fahrzyklus herangezogen. Als gesetzlicher Prüfzyklus besitzt er eine breite Anerkennung und gewährleistet eine weitreichende Absicherung der modellierten Sachbilanzdaten. Für weitere Analysen oder Hochrechnungen bietet das Modell auch die Möglichkeit, die Daten im Betrieb innerorts, außerorts oder auf Autobahnen zu berücksichtigen. Wegen der Vielzahl von Antriebsvarianten sind die Ergebnisse in jeder Kategorie in jeweils zwei Abbildungen grafisch dargestellt. Alle Vergleiche erfolgen zum Referenzfahrzeug mit der laufenden Nummer 1 (Lfd.-Nr. 1, Ref. VKM-Otto), einem 44 kW Ottomotor mit Saugrohreinspritzung und einer spezifischen CO<sub>2</sub>-Emission von 144 g/km (6 l/100km). In Tab. 7-49 findet sich eine Übersicht mit dem Verzeichnis aller untersuchten Varianten. Die dort angegebenen laufenden Nummern werden in den folgenden Abbildungen ergänzend in eckigen Klammern angegeben.

Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Ökologische Prioritäten <sup>4</sup>	ökologische Gefährdung	Abstand zum Ziel	Spez. Wirkungsbeitrag (Pkw)
		MITTEL	GROSS
Allgemeine ökologische Priorität	GROSS		

Die Darstellung des KEA unter Berücksichtigung der Pkw-Herstellung führt zu folgenden wesentlichen Aussagen (Abb. 4-11a, Abb. 4-11b).

- Direkteinspritzende Systeme der ersten Generation und elektromechanische Ventiltriebe (Lfd.-Nr. 2, 3) können zum Referenzantrieb bereits eine Gesamtenergiereduktion erreichen. Es wird zunächst nicht bewertet, dass Verbrauchseinsparungen vom Fahrprofil abhängen.
- Start/Stop-Hybridantriebe, Leichtlaufreifen und Leichtlauföle (Lfd.-Nr. 4-6) besitzen geringe Potentiale zur Reduktion des KEA.
- Zukünftige, leichtere Fahrzeuge (Lfd.-Nr. 7-12, 15-22, 24-56) können durch die Verwendung von energieaufwändigen Materialien in der Herstellung einen etwas höheren Energieverbrauch verursachen. Im Fahrzeugbetrieb sinkt dieser dann wieder wegen der reduzierten Fahrwiderstände.
- Hubraumreduzierte Pkw mit Aufladung, DI-Benzin- und Diesel-Pkw jeweils im Leichtbau (Lfd.-Nr. 7-10, 17-18) erreichen Minderungen von 20-40% (Benzin) und 35-45% (Diesel).
- Hybridvarianten (Lfd.-Nr. 11-12, 15-16, 24-31) reduzieren den KEA um 10-35% (Benzinhybrid) und 20-45% (Dieselhybrid). Das Potential der Parallelhybridantriebe zur Verbrauchsreduktion ist höher als das Potential der seriellen Hybride. Der KEA der Antriebsherstellung wird stark von der Batteriegröße bestimmt. Er liegt rund 10-40% über dem eines Dieselantriebes.
- Bioenergieträger in Verbrennungsmotoren (Lfd.-Nr. 19-20, 36-37, 40-41, 43, 45, 47) reduzieren den KEA, abhängig von den Koppelprodukten, um 60-70% zur Referenz.
- Erdgas, Dimethylether und Methanol auf der Basis von Erdgas in Verbrennungsmotoren (Lfd.-Nr. 21-22, 32-35, 38-39) senken den KEA gegenüber der Referenz um 15-35% (Erdgas), 0-25% (DME) und 0-20% (Methanol).
- Wasserstoffverbrennungsmotoren (Lfd.-Nr. 48-51) mindern den KEA um 5-15% bei Verwendung von Druckwasserstoff aus Erdgas und erhöhen diesen im Vergleich zur Referenz bei Verwendung erneuerbarer Energieträger um bis zu 25%.
- Brennstoffzellenfahrzeuge (Lfd.-Nr. 42-47, 52-55) können bei Verwendung von Wasserstoff den KEA um 0-40% reduzieren, bei Verwendung von Methanol um 5-55%. Das höhere Potential gilt für erneuerbare Treibstoffe.
- Elektrofahrzeuge (Lfd.-Nr. 56) reduzieren 17% des KEA. Vorteile ergeben sich im Stop-and-go-Betrieb.

<sup>4</sup> Aus den einzelnen ökologischen Prioritäten (ökologischen Gefährdung, Abstand zum Ziel, spezifischer Wirkungsbeitrag) in Tab. 3-1, ergibt sich eine arithmetisch gemittelte allgemeine ökologische Priorität.

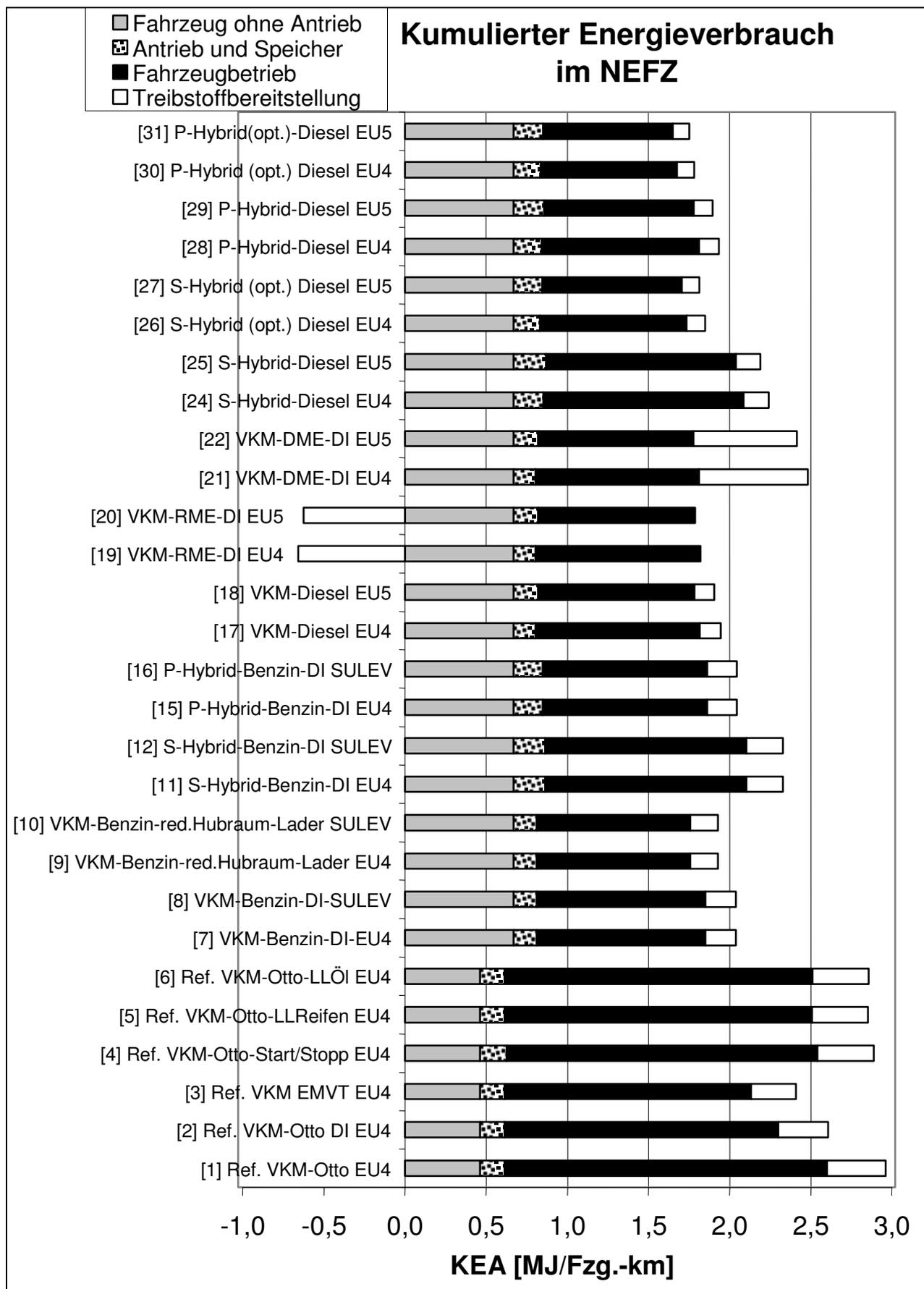


Abb. 4-11a: Kumulierter Energieaufwand für Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

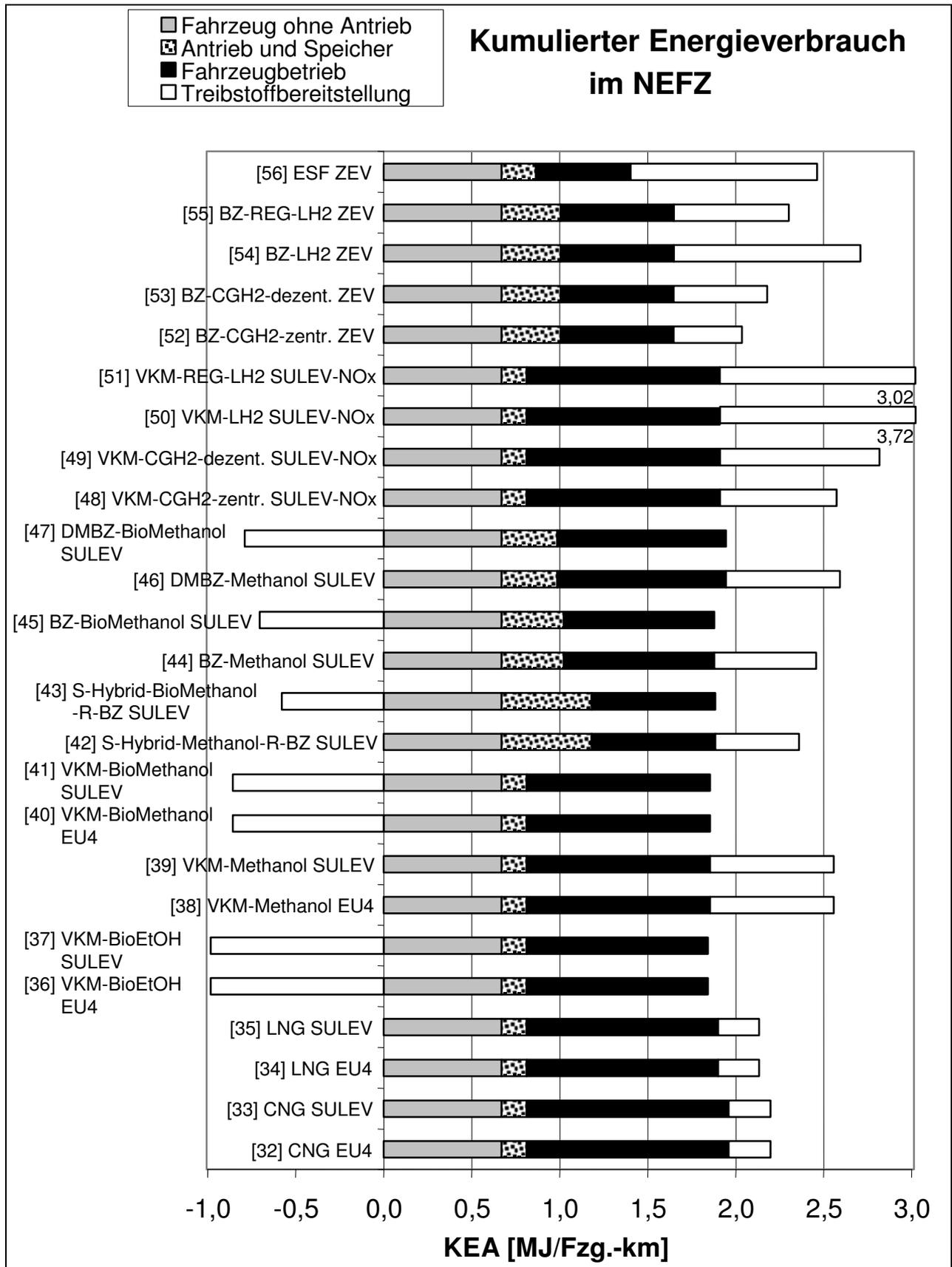


Abb. 4-11b: Kumulierter Energieaufwand für Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

*Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-äquivalent)*

Ökologische Prioritäten	ökologische Gefährdung	Abstand zum Ziel	Spez. Wirkungsbeitrag (Pkw)
	<b>SEHR GROSS</b>	<b>SEHR GROSS</b>	<b>SEHR GROSS</b>
Allgemeine ökologische Priorität	<b>SEHR GROSS</b>		

Die Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-äquivalenten Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung der Pkw-Herstellung sind in Abb. 4-12a und Abb. 4-12b zusammengefasst.

- Für Antriebe im Betrieb mit Benzin und Diesel  
(Lfd.-Nr. 1-12, 15-18, 24-31) gelten die Aussagen bezüglich KEA gleichermaßen für die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Benzin- und Dieselantriebe und deren Varianten. Benzin und Dieselmotoren verursachen energiebezogen identische CO<sub>2</sub>-Emissionen. Berücksichtigt man zusätzlich die Vorteile der Leichtbaukarosserie, können die treibhausrelevanten Emissionen durch direkteinspritzende Benzin- und Dieselmotoren (Lfd.-Nr. 7-8, 17-18) unter Berücksichtigung der Pkw-Emissionen und der Herstellung der Kraftstoffe um 47-51% reduziert werden. Berücksichtigt man weiterhin die höheren Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung bei Leichtbaufahrzeugen, so ergeben sich für diese Antriebsvarianten noch Vorteile von 34-37% gegenüber der Referenz.
- Rapsölmethylester in Dieselmotoren  
(Lfd.-Nr. 19-20) führt gegenüber der Referenz und unter Berücksichtigung der Pkw-Emissionen und der Herstellung der Kraftstoffe zu 63% niedrigere treibhausrelevante Emissionen. Unter Berücksichtigung der Fahrzeugherstellung (Leichtbau) reduziert sich dieser Vorteil auf 48% gegenüber dem Referenz-Pkw.
- Erdgasbasierende Treibstoffe in Verbrennungskraftmaschinen  
(Lfd.-Nr. 21-22, 32-35, 38-39) führen zu einer CO<sub>2</sub>-Reduktion um durchschnittlich 30%. Erdgas besitzt einen um 25% geringeren Kohlenstoffgehalt im Vergleich zu Benzin und Diesel. Die direkte Verwendung von Erdgas weist Vorteile gegenüber der Nutzung anderer erdgasbasierender Treibstoffe (z.B. Methanol, DME) auf. Es werden dann Minderungen von 35-39% erreicht.
- Flüssigwasserstoff in Verbrennungskraftmaschinen  
(Lfd.-Nr. 50, 54) weist deutlich höhere Treibhausgasemissionen gegenüber anderen Wasserstoffvarianten auf. Besonders die Herstellung aus nicht-erneuerbaren Quellen und die ineffiziente Nutzung in Verbrennungskraftmaschinen führt zu hohen Treibhausgasemissionen.
- Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen  
(Lfd.-Nr. 51, 55) weist mit einer Reduktion um 73-77% die mit Abstand niedrigsten Treibhausgasemissionen auf.
- Methanol und Ethanol aus erneuerbaren Quellen  
(Lfd.-Nr. 36-37, 40-41, 43, 45, 47) erreichen Treibhausgaseminderungen gegenüber der Referenz von 60-70% in Brennstoffzellen und Verbrennungskraftmaschinen.
- Erdgasbasierte Treibstoffe für Brennstoffzellenantriebe  
(Lfd.-Nr. 42, 44, 46, 48-50, 52-54) erreichen Minderungen um 24-44%, sofern Wasserstoff

hergestellt und verwendet wird. Die Minderung von 24% ergibt sich für Flüssigwasserstoff. Methanol in Brennstoffzellen erreicht Minderungen um 30-35%.

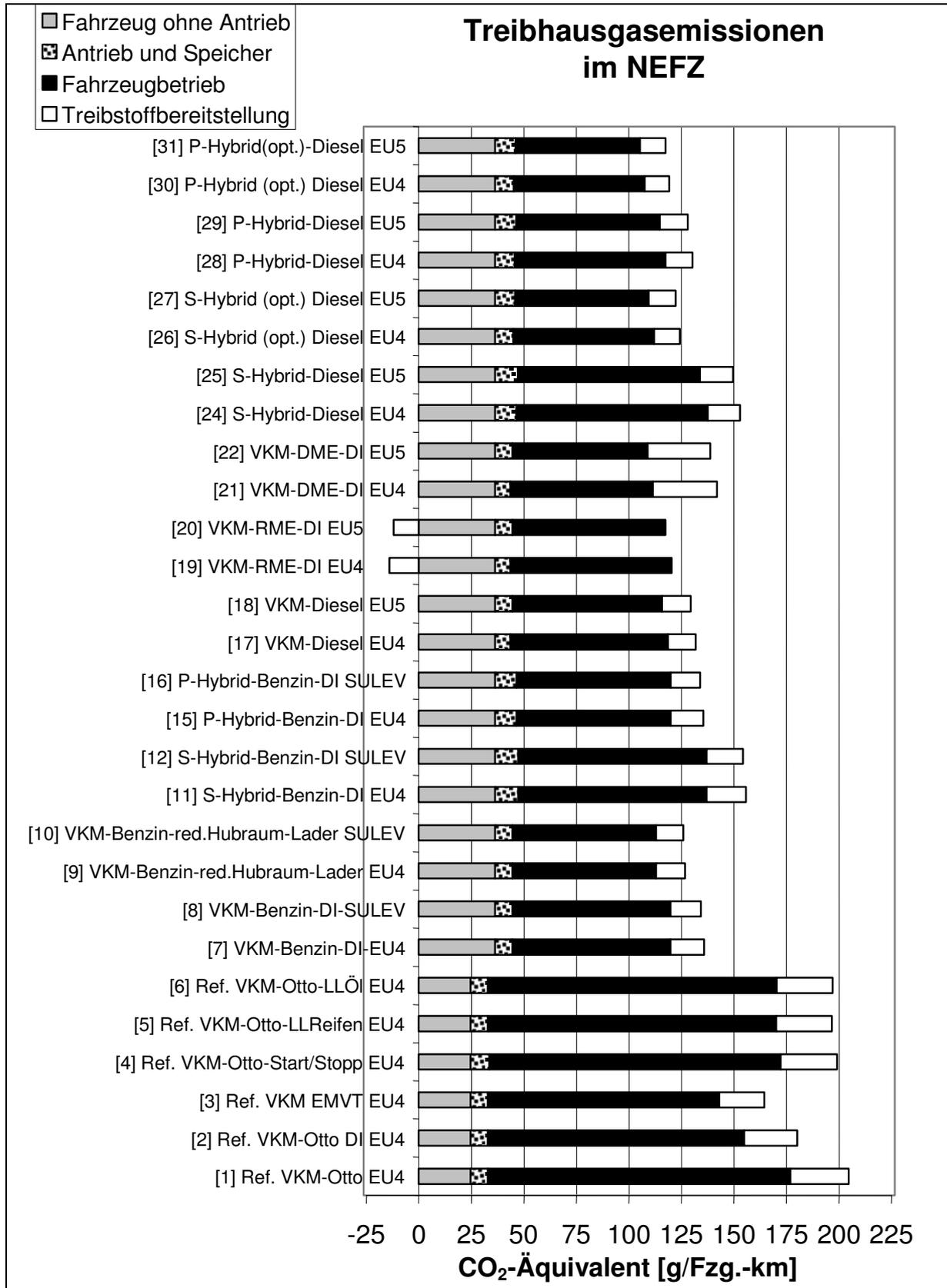


Abb. 4-12a: Treibhausgasemissionen für Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

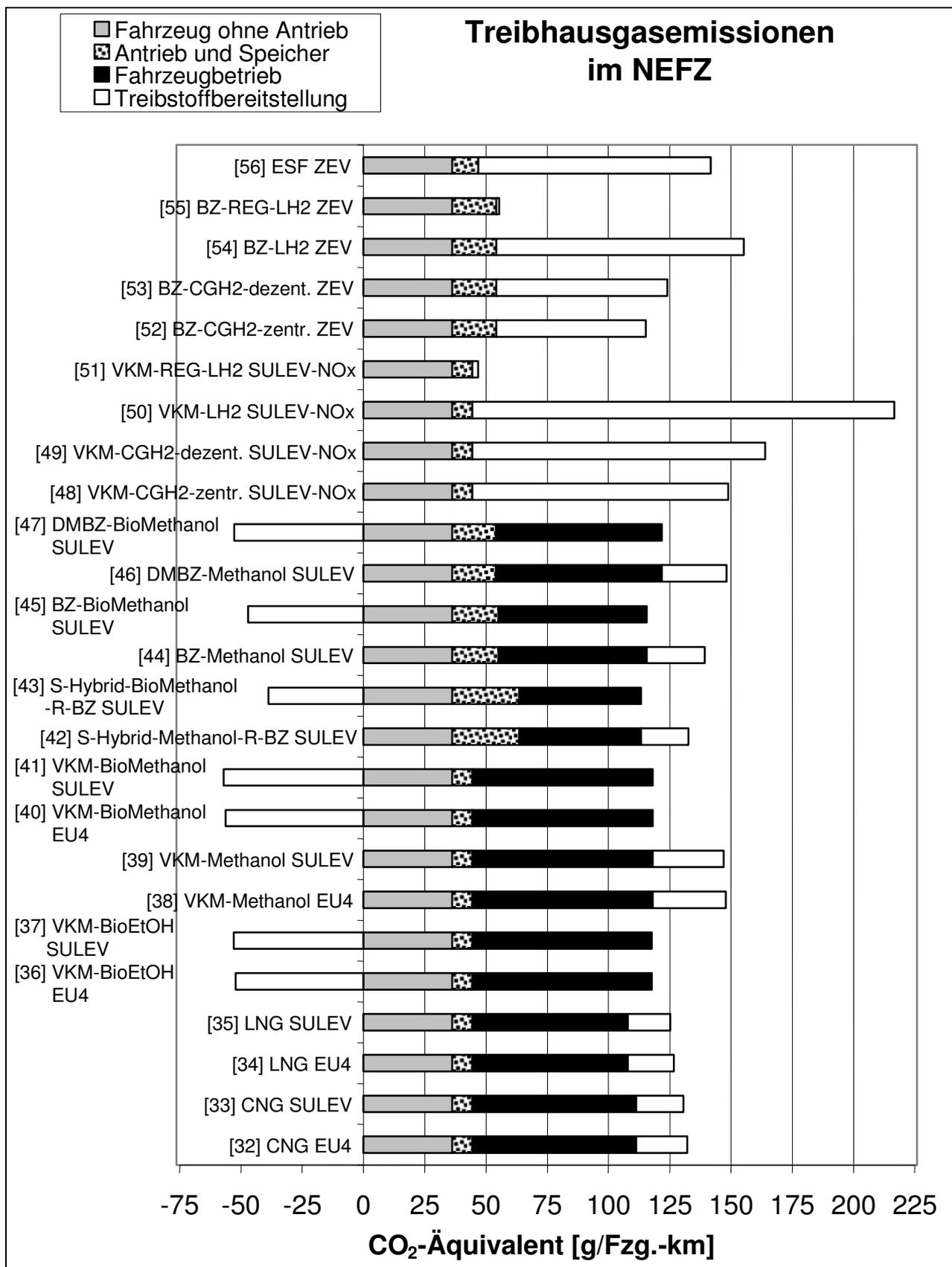


Abb. 4-12b: Treibhausgasemissionen für Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

*Stratosphärischer Ozonabbau (N<sub>2</sub>O)*

Ökologische Prioritäten	ökologische Gefährdung	Abstand zum Ziel	Spez. Wirkungsbeitrag (Pkw)
	<b>SEHR GROSS</b>	<b>GERING</b>	<b>GROSS</b>
Allgemeine ökologische Priorität	<b>GROSS</b>		

Der stratosphärische Ozonabbau wird in der Regel als FCKW 11-äquivalente Emission angegeben. Da auch die N<sub>2</sub>O-Emissionen zum stratosphärischen Ozonabbau beitragen, jedoch kein Äquivalenzfaktor für FCKW 11 existiert, werden die zum stratosphärischen Ozonabbau beitragenden N<sub>2</sub>O-Emissionen direkt bewertet. Für den Fahrzeugbetrieb sind im wesentlichen die N<sub>2</sub>O-Emissionen von Bedeutung, die FCKW-Emissionen aus Klimaanlage werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Abb. 4-13a und Abb. 4-13b quantifizieren die N<sub>2</sub>O-Emissionen für den Fahrzeugbetrieb unter Berücksichtigung der Treibstoffbereitstellung und die Pkw-Herstellung.

- Alle zukünftigen Leichtbaufahrzeuge (Lfd.-Nr. 7-12, 15-22, 24-56) weisen ausnahmslos höhere N<sub>2</sub>O-Emissionen auf. Dies ist auf deutlich höhere Emissionen für den Leichtbau (Aluminium, Magnesium) zurückzuführen. Hier wird empfohlen, weitere Untersuchungen der Umweltbilanzen durchzuführen.
- Fahrzeuge mit Dieseltreibstoff (Lfd.-Nr. 17-18, 24-31) weisen höhere N<sub>2</sub>O-Abgasemissionen im Fahrbetrieb auf als das Referenzfahrzeug. Erste Schätzungen zeigen (Abb. 7-24, Anhang), dass mit der Grenzwertstufe EURO 5 ein weiterer Anstieg der N<sub>2</sub>O-Emissionen nicht auszuschließen ist. Abschließende Aussagen können jedoch erst getroffen werden, sobald Messungen an EURO 5-Pkw mit zukünftigen Abgasminderungstechnologien (z.B. SCR-, DeNO<sub>x</sub>-Katalysatoren, kombinierte Partikelfilter) zur Verfügung stehen, durch deren Einsatz eine Reduktion der N<sub>2</sub>O-Emissionen zu erwarten wäre.
- Hybridantriebe und Brennstoffzellenvarianten (Lfd.-Nr. 11-12, 15-16, 24-31, 42-47, 52-56) weisen ebenfalls höhere N<sub>2</sub>O-Emissionen in der Batterieherstellung, Stackherstellung und Bereitstellung der elektronischen Komponenten auf. Die Höhe der N<sub>2</sub>O-Emissionen ist jedoch stark von der Größe der im Pkw verbauten Batterien und Stacks abhängig.
- Rapsölmethylester und Bioethanol (Lfd.-Nr. 19-20, 36-37) führen zu den absolut höchsten N<sub>2</sub>O-Emissionen durch die Treibstoffbereitstellung. Dies ist durch die höhere Stickstoffkonzentration in der Humusschicht (u.a. Stickstoffdüngung) von landwirtschaftlichen Flächen begründet. Bei der Umsetzung von Stickstoff durch Bodenbakterien (Nitrifikation, Denitrifikation) entweicht N<sub>2</sub>O als Gas in die Atmosphäre.

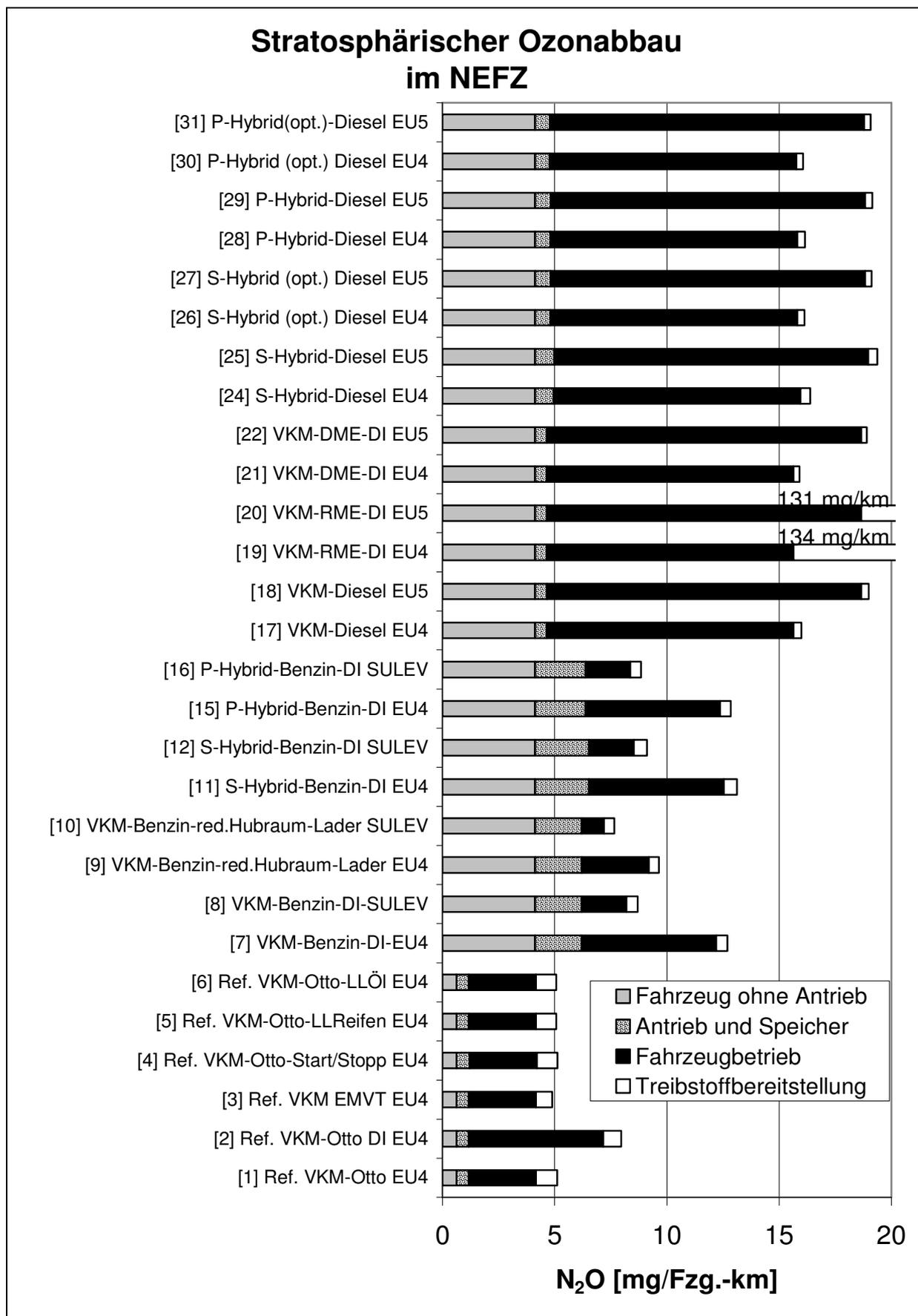


Abb. 4-13a: Stratosphärischer Ozonabbau für Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

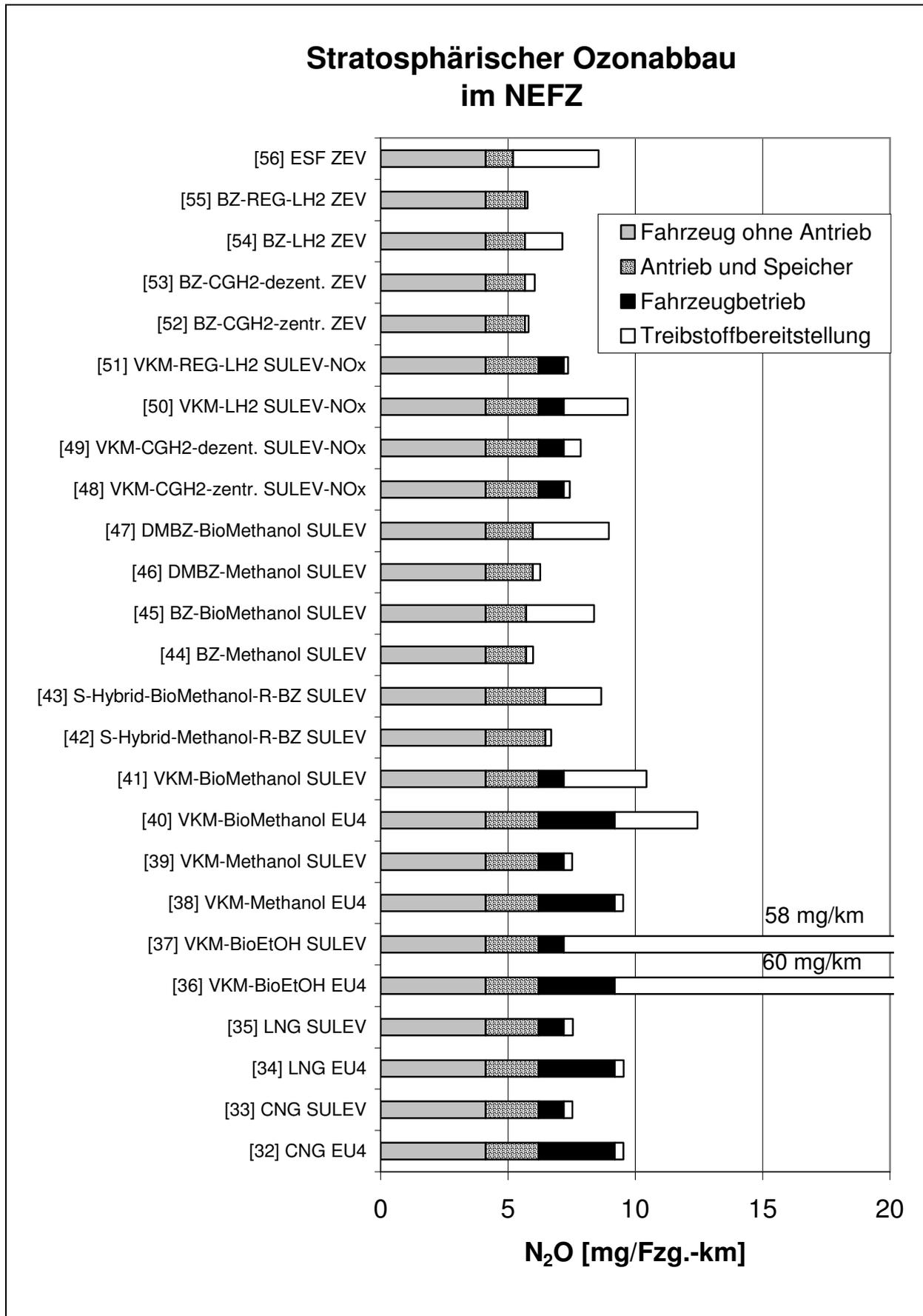


Abb. 4-13b: Stratosphärischer Ozonabbau für Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

Humantoxizität (Partikelkern, NO<sub>2</sub>, Formaldehyd)

Ökologische Prioritäten	ökologische Gefährdung	Abstand zum Ziel	Spez. Wirkungsbeitrag (Pkw)
	<b>Eine differenzierte Darstellung der Priorität ist nicht möglich.</b>		
Allgemeine ökologische Priorität	<b>SEHR GROSS</b>		

Die Humantoxizität wird nur in der lokalen Ortsklasse I erhoben. In diesem Fall, in dem der NEFZ als Bewertungsbasis genutzt wird, wird der ungünstige Fall gewählt, nach dem 100% der Fahrleistungen im Stadtverkehr erbracht werden und dort humantoxisch wirken. Das Modell würde es außerdem erlauben, Fahrleistungsanteile des NEFZ in die regionale Ortsklassen II zu verschieben. Die humantoxische Wirkung der Partikelkerne, von NO<sub>2</sub> und von Formaldehyd addiert sich in ihrer Wirkung auf den menschlichen Organismus nicht. Die folgenden Abb. 4-14a bis Abb. 4-14b fassen die Ergebnisse zusammen.

- SULEV-Konzepte für Verbrennungskraftmaschinen im Benzin- und Erdgasbetrieb (Lfd.-Nr. 8, 10, 12, 16, 33, 35) können die Humantoxizität durch Formaldehyd und NO<sub>2</sub> gegenüber der Referenz (Benzin, EURO 4) um etwa 80% senken. Problematisch können Konzepte von DI-Benzinmotoren werden, falls sie zu erhöhter Partikelemission führen.
- SULEV-Konzepte für Verbrennungskraftmaschinen im Wasserstoffbetrieb (Lfd.-Nr. 48-51) können die Humantoxizität gegenüber der Referenz (Benzin, EURO 4) durch Formaldehyd um rund 80% und durch Partikel um 99% senken. Allein die Humantoxizität durch NO<sub>2</sub> steigt um den Faktor 3 an.
- Dieselfahrzeuge der Grenzwertstufe EURO 4 (Lfd.-Nr. 17, 24, 26, 28, 30) erhöhen die Humantoxizität gegenüber der Referenz durch Formaldehyd um den Faktor 9, durch NO<sub>2</sub> um den Faktor 7 und durch Partikel um einen mehr als 120-fachen Wert im Abgasstandard EURO 4 (Diesel). Im Vergleich zu diesem hohen Niveau kann sie mit der Grenzwertstufe EURO 5 bei Partikeln auf ein im Vergleich zum Referenz-Ottomotor nur noch ca. 30% höheren Wert und bei NO<sub>2</sub> auf einen um 70% höheren Wert reduziert werden. Um dem Standard EURO 5 zu genügen, sind Partikelfilter und NO<sub>x</sub>-Abgasminderungssysteme notwendig.
- Das Fahrzeug mit Rapsölmethylester der Grenzwertstufe EURO 4 (Lfd.-Nr. 19) erhöht die Humantoxizität gegenüber Diesel durch Formaldehyd um den Faktor 3 und durch NO<sub>2</sub> um 30%. Günstiger erweist sich die humantoxische Wirkung durch Partikel bei einer Reduktion um 40% gegenüber einem vergleichbaren Dieselfahrzeug.
- Alkoholkraftstoffe in Ottomotoren der Grenzwertstufe EURO 4 (Lfd.-Nr. 36, 38, 40) weisen hohe humantoxische Formaldehydemissionen auf, die sogar das Niveau der Dieselmotoren überschreiten.
- Brennstoffzellenfahrzeuge und batterieelektrische Fahrzeuge (Lfd.-Nr. 42-47, 52-56) weisen ausnahmslos keine humantoxischen Emissionen auf. Formaldehydemissionen der methanolgetriebenen Brennstoffzellenfahrzeuge scheinen vernachlässigbar. Dies ist ein Vorteil gegenüber der Verbrennung von Alkoholen in Motoren.

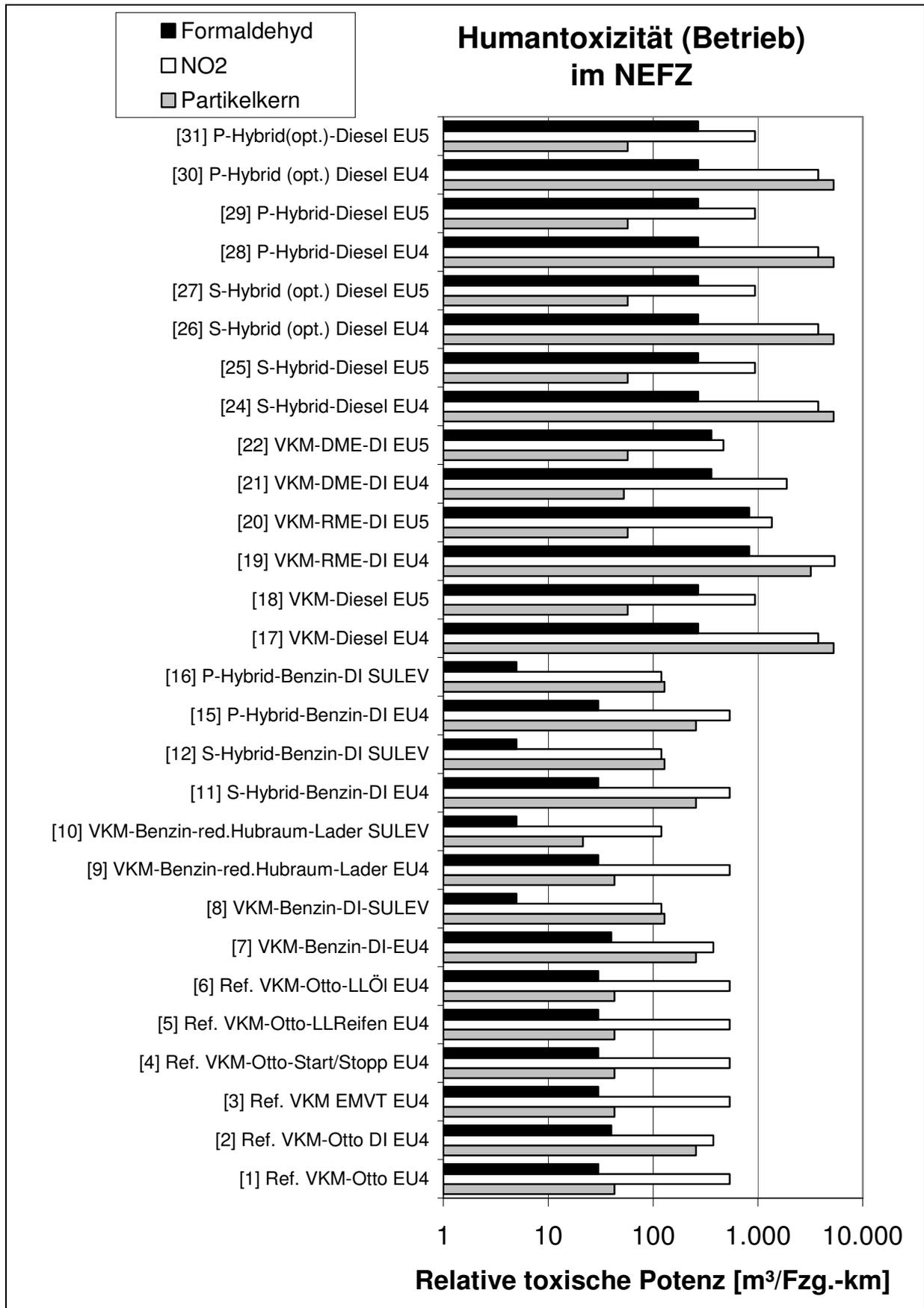


Abb. 4-14a: Humantoxizität für Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

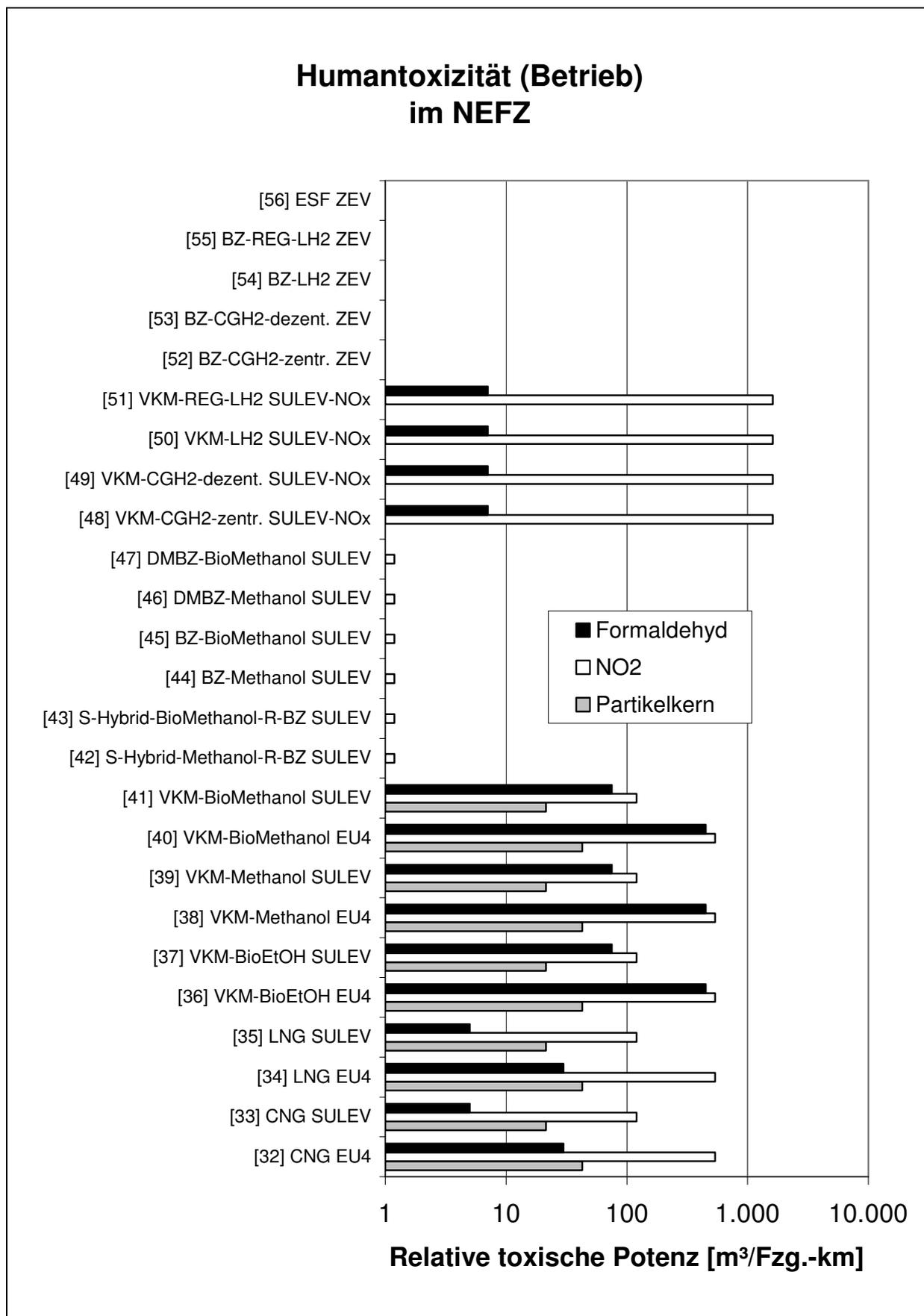


Abb. 4-14b: Humantoxizität für Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

*Kanzerogenität (Partikelkern, Benzol, Benz(a)pyren für PAH, Formaldehyd)*

Ökologische Prioritäten	ökologische Gefährdung	Abstand zum Ziel	Spez. Wirkungsbeitrag (Pkw)
	<b>Eine differenzierte Darstellung der Priorität ist nicht möglich.</b>		
Allgemeine ökologische Priorität	<b>SEHR GROSS</b>		

Die kanzerogene Wirkung des Pkw-Betriebes wird anhand des additiv wirkenden Unit-Risk aus den Emissionen von Benz(a)pyren (stellvertretend für die PAH-Emissionen), Benzol, Formaldehyd und Partikeln ermittelt. Auch hier wird zunächst angenommen, dass 100% der Fahrleistungen im NEFZ lokal (OK I) wirken. Die folgenden [Abb. 4-15a](#) bis [Abb. 4-15b](#) fassen die Ergebnisse zusammen.

- RME- und Dieselfahrzeuge der Grenzwertstufe EURO 4 (Lfd.-Nr. 17, 19, 24, 26, 28, 30) weisen ein 10- bis 15-fach höheres Risiko gegenüber dem Referenzfahrzeug auf. Dies ist maßgeblich auf die Partikelemissionen zurückzuführen. Durch Partikelfilter kann das Unit Risk ein Niveau unter dem des Referenz-Ottomotors erreichen.
- Benzin-Direkteinspritzung (Lfd.-Nr. 7-8, 11-12, 15-16) führt zu einem Anstieg des Unit-Risk – hier um 60% gegenüber der Referenz – sofern sie zu erhöhter Partikelemission führen. Obwohl das Risiko im Abgasstandard SULEV deutlich gesenkt werden kann, empfiehlt es sich, die Partikelproblematik auch in diesem strengen Abgasstandard nicht zu vernachlässigen. Vereinfacht wird für SULEV zunächst eine Reduktion der Partikel um 50% angenommen. Diese Annahme muss zukünftig an Konzepten mit Benzin-Direkteinspritzung verifiziert werden. Dann ist auch zu klären, ob die Minderung der Partikel durch einen zusätzlichen Partikelfilter oder durch einen weitgehenden homogenen Betrieb erreicht werden kann.
- Sonstige alternative Antriebe (Lfd.-Nr. 9-10, 21-22, 32-56) haben deutliche Vorteile in der Bewertung des Unit-Risk. Gleichmaßen hervorzuheben sind die Verbrennung von Erdgas, Methanol, Ethanol und Wasserstoff, ebenso wie die Nutzung von Methanol und Wasserstoff in Brennstoffzellen.

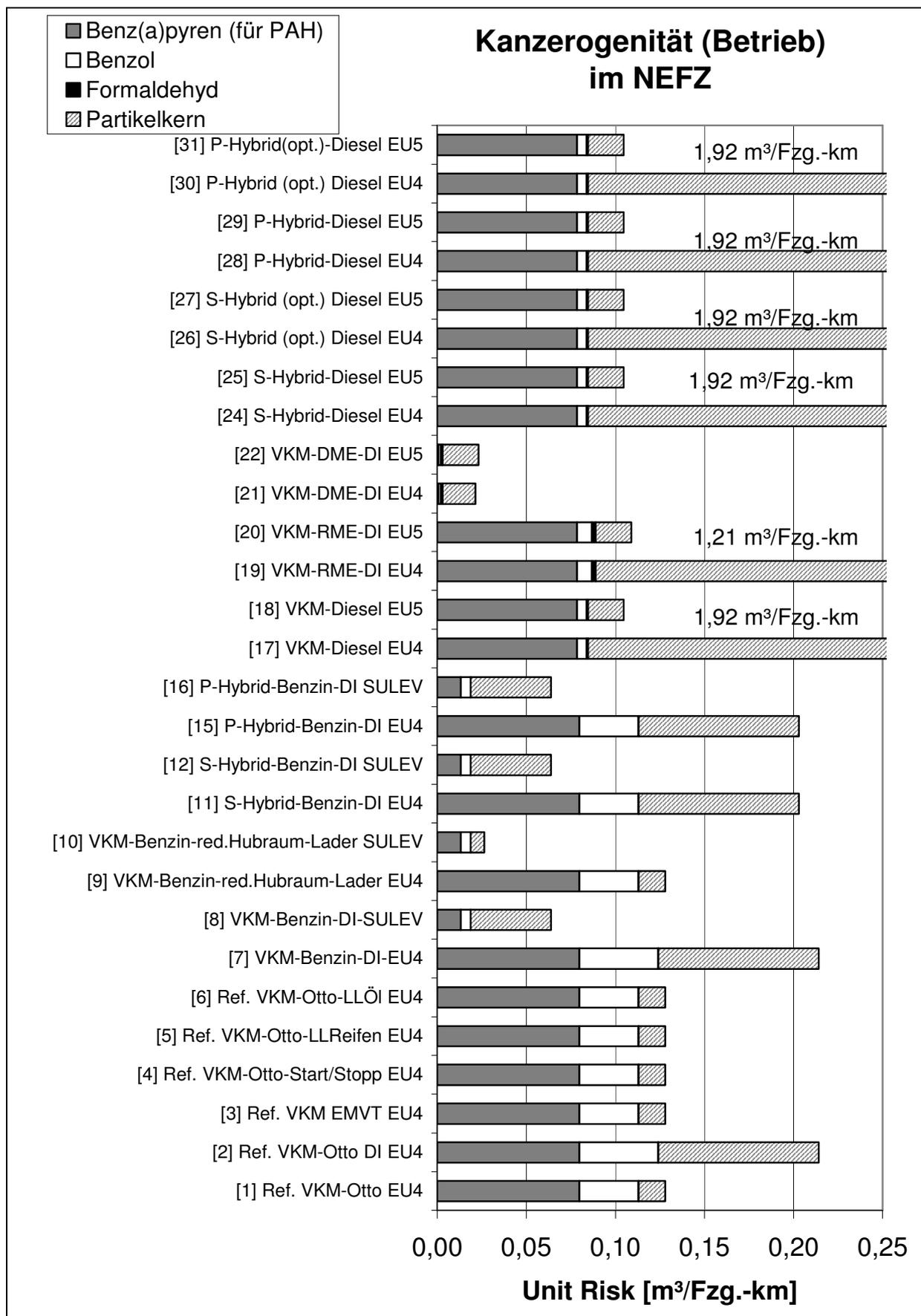


Abb. 4-15a: Kanzerogenität für Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

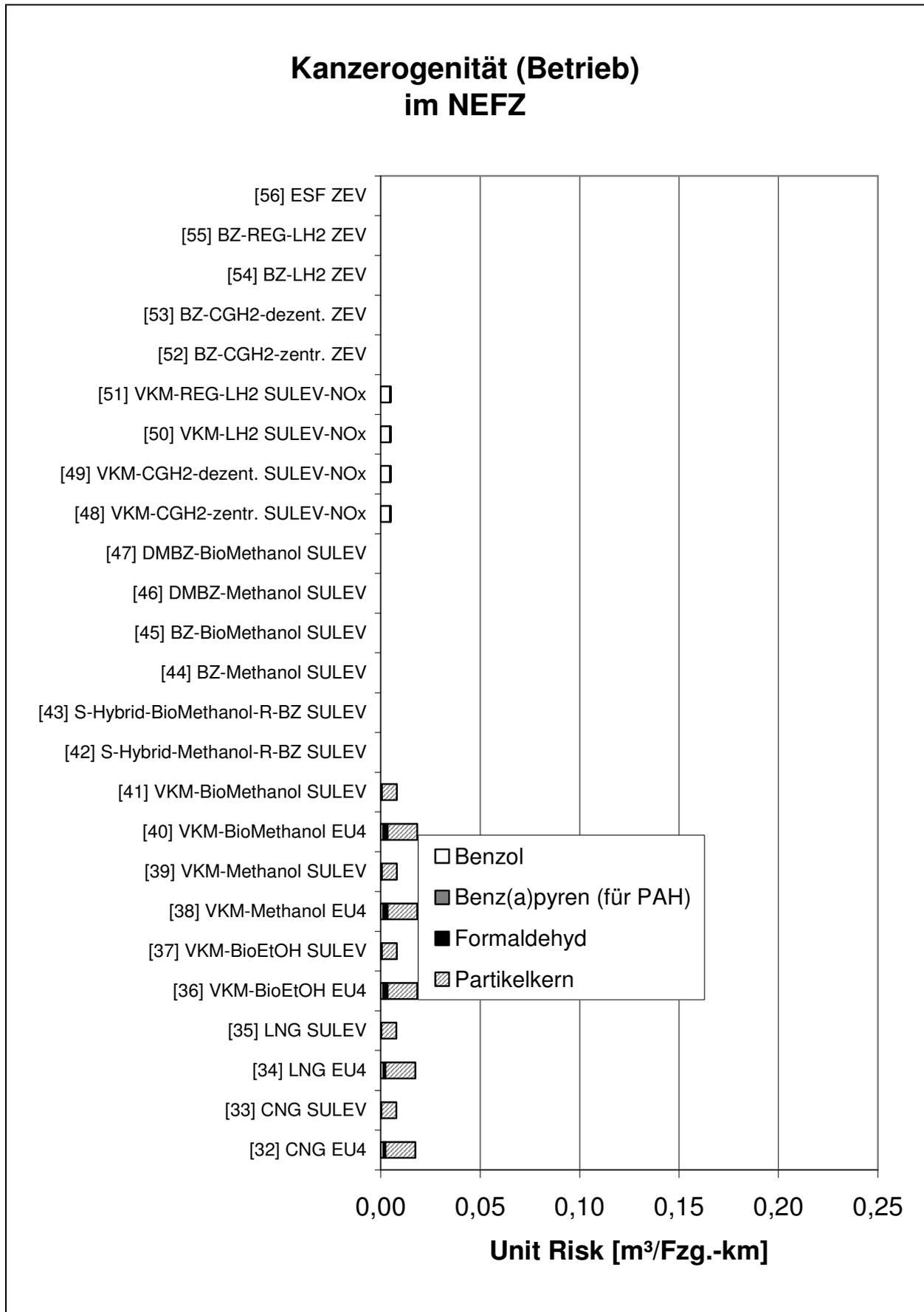


Abb. 4-15b: Kancerogenität für Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

Photochemische Oxidantienbildung

Ökologische Prioritäten	ökologische Gefährdung	Abstand zum Ziel	Spez. Wirkungsbeitrag (Pkw)
		GERING	GROSS
Allgemeine ökologische Priorität	MITTEL		

Im Zuge der Bewertung der photochemischen Oxidantienbildung werden die Ergebnisse der NO<sub>x</sub>-korrigierten Wirkungen angegeben. Die folgenden Abb. 4-16a bis Abb. 4-16b fassen die Ergebnisse zusammen.

- Diesel- und RME-Fahrzeuge der Grenzwertstufe EURO 4 (Lfd.-Nr. 17, 19, 24, 26, 28, 30) tragen gegenüber der benzinbetriebenen Referenz in der Grenzwertstufe EURO 4 rund 20% bis 50% mehr zum Sommersmog bei. Erst mit den Anforderungen EURO 5 kann das Niveau der Referenz erreicht (RME) oder bei Dieselmotoren sogar um 20% unterschritten werden. Dies ist in den niedrigeren HC-Emissionen der Dieselmotoren und in einer weiteren Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emissionen durch einen EURO 5 Standard begründet.
- Weitere Treibstoffe biogenen Ursprunges, (Lfd.-Nr. 36-37, 40-41, 43, 45, 47) wie Bioethanol, erhöhen den Anteil an reaktiven Vorläuferemissionen für Sommersmog um 10 bis 30% gegenüber der Referenz. Biomethanol aus Holz erhöht diese Emissionen sogar um 100 bis 150%. Dies gilt auch, falls eine Brennstoffzelle eingesetzt wird und ist auf die Emissionen der Treibstoffbereitstellung zurückzuführen.
- Erdgas und Wasserstoff aus Erdgas (32-35, 48-50, 52-54) können die Sekundärschadstoffe zur photochemischen Oxidantienbildung im Vergleich zur Referenz um 25-50% senken. Druckwasserstoff in Verbrennungskraftmaschinen führt jedoch zu geringeren Minderungen zur Referenz von 10%, Flüssigwasserstoff führt tendenziell sogar zu einer Emissionserhöhung (+3%).
- Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen (Lfd.-Nr. 51, 55) kann die Sekundärschadstoffe zur photochemischen Oxidantienbildung der Referenz um durchschnittlich 50% senken.
- Methanol auf Basis von Erdgas (Lfd.-Nr. 38-39, 42, 44, 46) mindert die Sekundärschadstoffe zur photochemischen Oxidantienbildung gegenüber der Referenz unabhängig vom Antrieb (Verbrennungskraftmaschine, Brennstoffzelle) um durchschnittlich 40%, sobald mindestens der SULEV Standard vorausgesetzt wird. Im Standard EURO 4 liegt die Minderung des Verbrennungsmotors noch bei etwa 25% gegenüber der Referenz.
- Elektrostraßenfahrzeuge (Lfd.-Nr. 56) mindern die Sekundärschadstoffe zur photochemischen Oxidantienbildung gegenüber der Referenz um 55%.

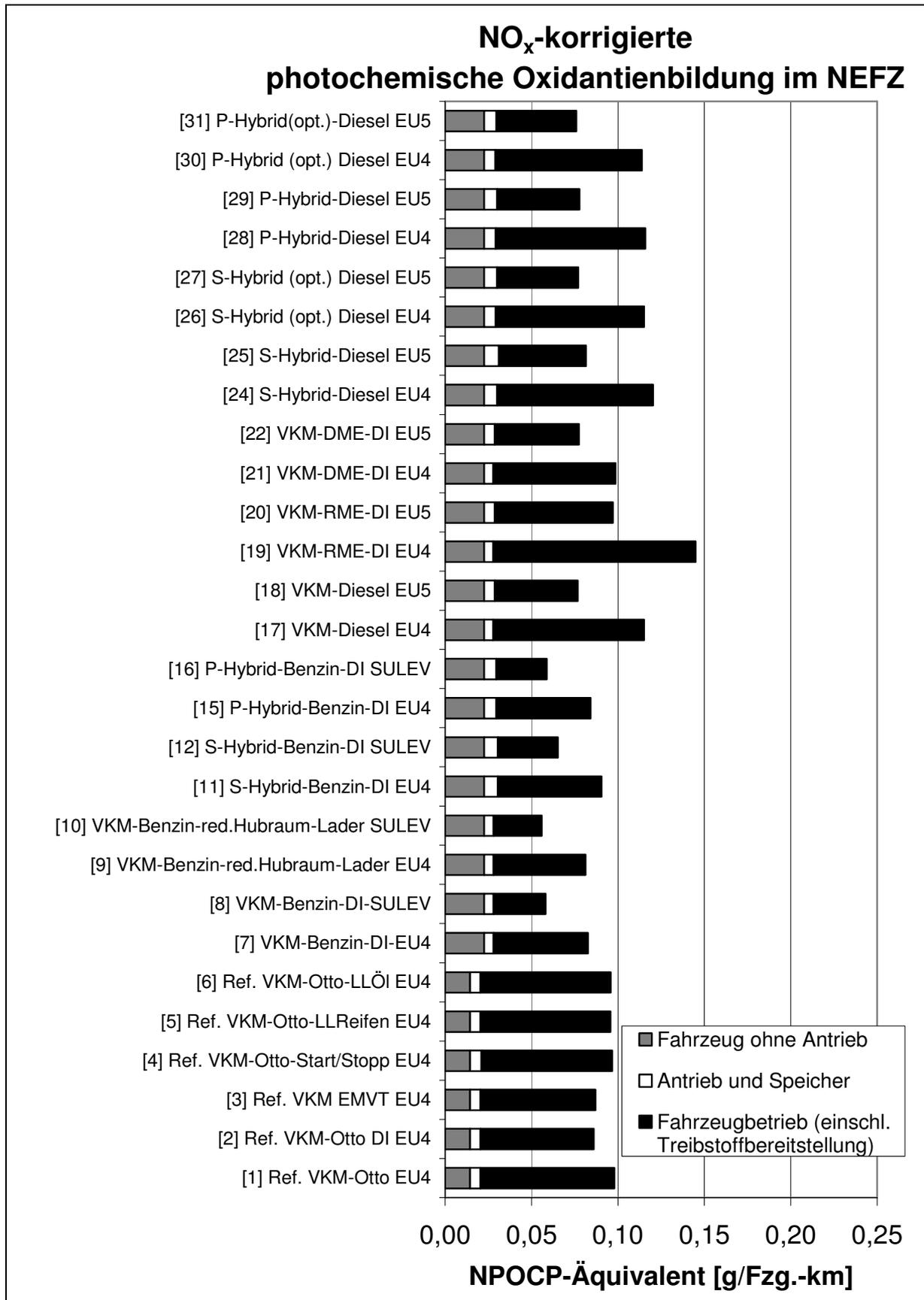


Abb. 4-16a: Photochemische Oxidantienbildung für Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

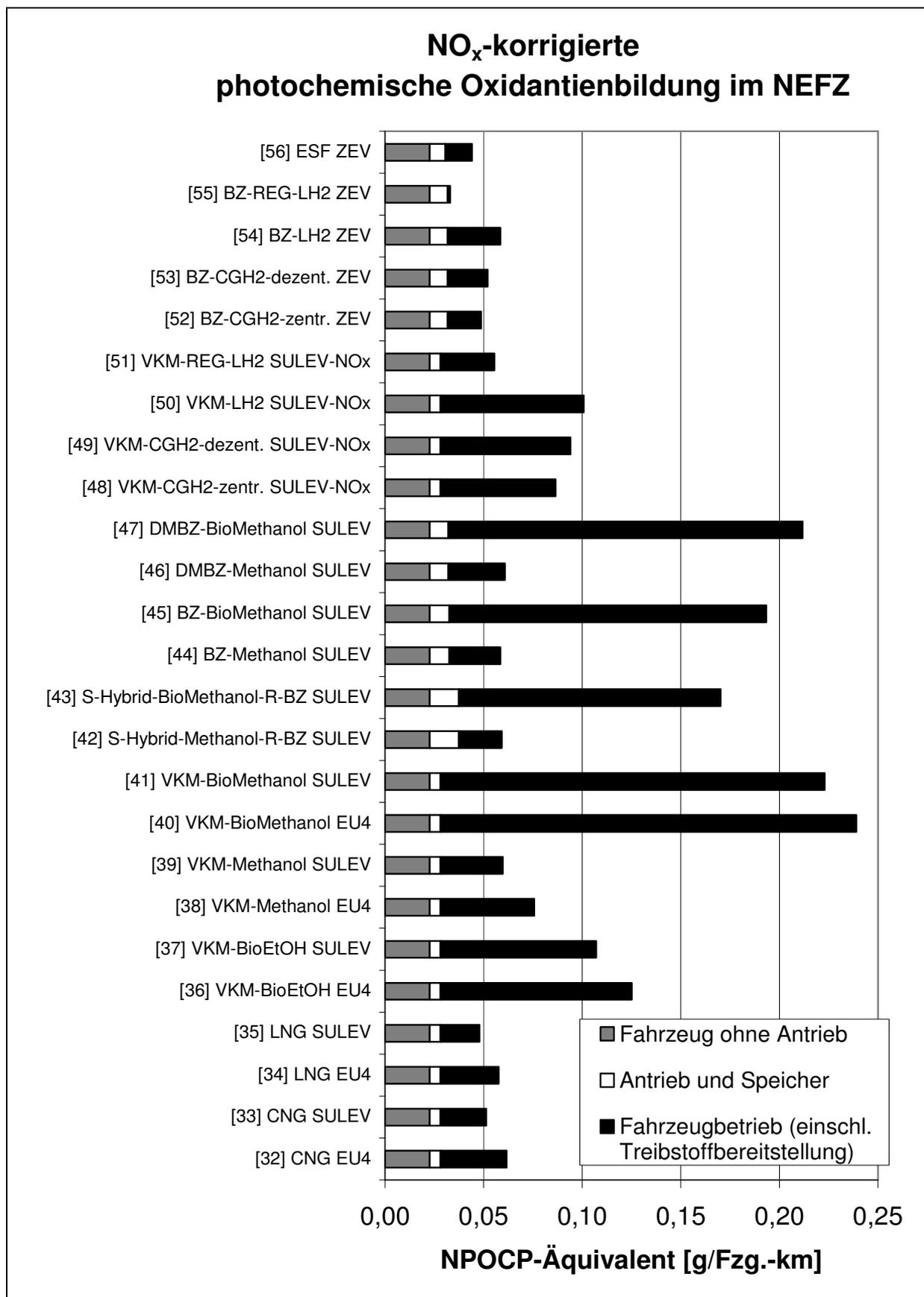


Abb. 4-16b: Photochemische Oxidantienbildung für Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

Versauerung

Ökologische Prioritäten	ökologische Gefährdung	Abstand zum Ziel	Spez. Wirkungsbeitrag (Pkw)
	GROSS	GROSS	MITTEL
Allgemeine ökologische Priorität	GROSS		

Im Zuge der Bewertung der Versauerung werden die SO<sub>2</sub>-äquivalenten Emissionen angegeben. Die folgenden Abb. 4-17a bis Abb. 4-17b fassen die Ergebnisse zusammen.

- Alle Leichtbauvarianten (Lfd.-Nr. 7-12, 15-22, 24-56) erhöhen die Gesamtemissionen, die zur Versauerung beitragen, deutlich. Der Leichtbau, der im Zuge dieser Modellierungen nicht zuletzt durch die Verwendung von Aluminium möglich wird, ist mit mehr als 9-fach höheren SO<sub>2</sub>-äquivalenten Emissionen verbunden. Die Bauteilgruppen Fahrwerk, Innenausstattung und Rohbau verursachen bei der Leichtbauvariante 60% höhere NO<sub>x</sub>- und SO<sub>2</sub>-Emissionen.
- Im Fahrzeugbetrieb ergeben sich für RME, CNG und LNG in Verbrennungskraftmaschinen (Lfd.-Nr. 19-20, 32-35) rund 10 bis 25% höhere SO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen und für Bioethanol (Lfd.-Nr. 36-37) mehr als doppelt so hohe Emissionen im Vergleich zur Referenz. Alle anderen Varianten – Benzin, Diesel, Methanol, DME – (Lfd.-Nr. 7-12, 15-18, 21-22, 24-31, 38-39, 42, 44) haben etwa um die Hälfte reduzierte versauernd wirkenden Emissionen im Fahrbetrieb. Die mit Abstand niedrigsten SO<sub>2</sub>-äquivalenten Emissionen, bei Minderungen um 90-99% gegenüber der Referenz, erreichen Wasserstoffantriebe im Brennstoffzellenbetrieb (80-90% im verbrennungsmotorischen Betrieb) und Elektroantriebe (Lfd.-Nr. 52-56).

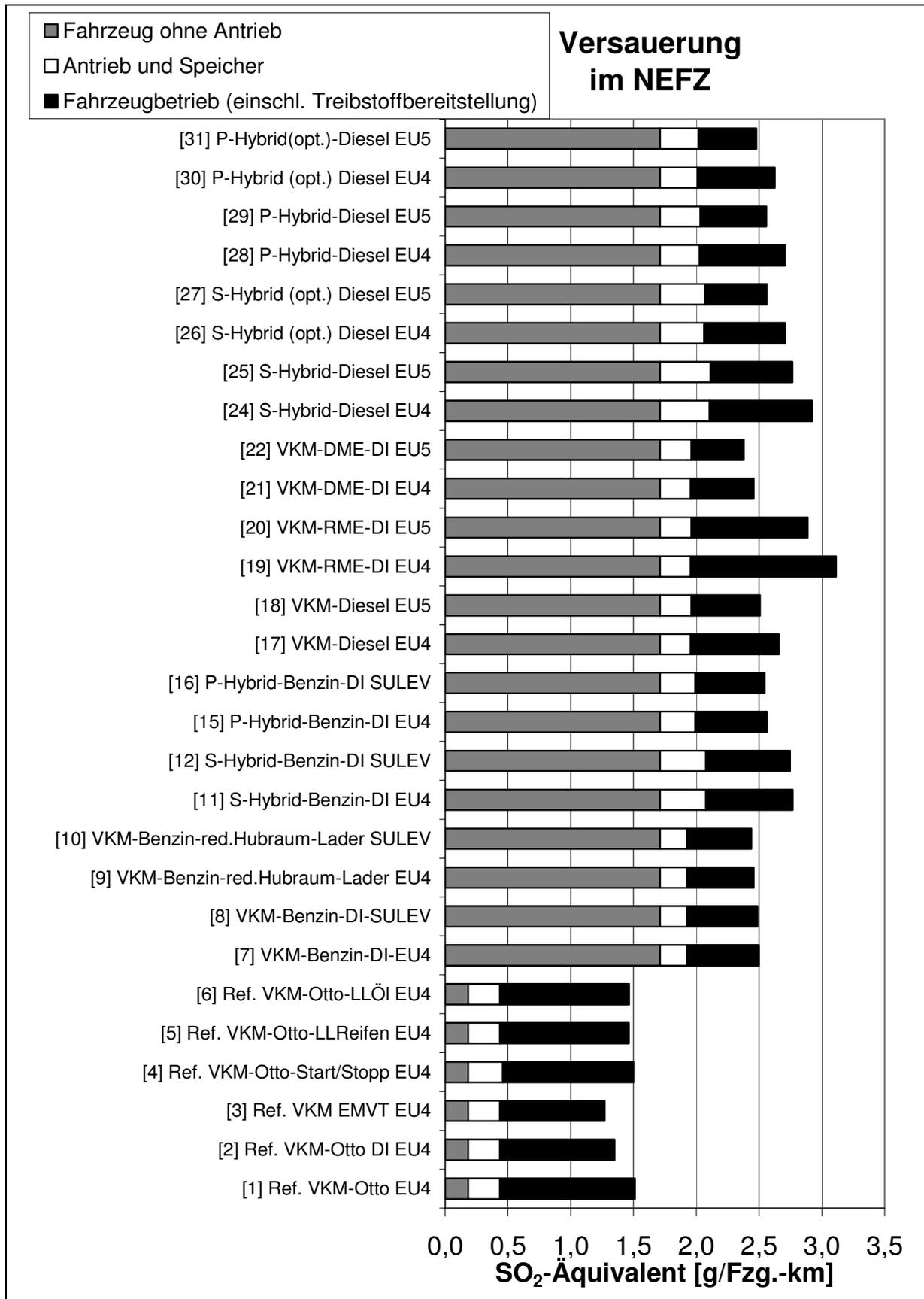


Abb. 4-17a: Versauerung durch Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

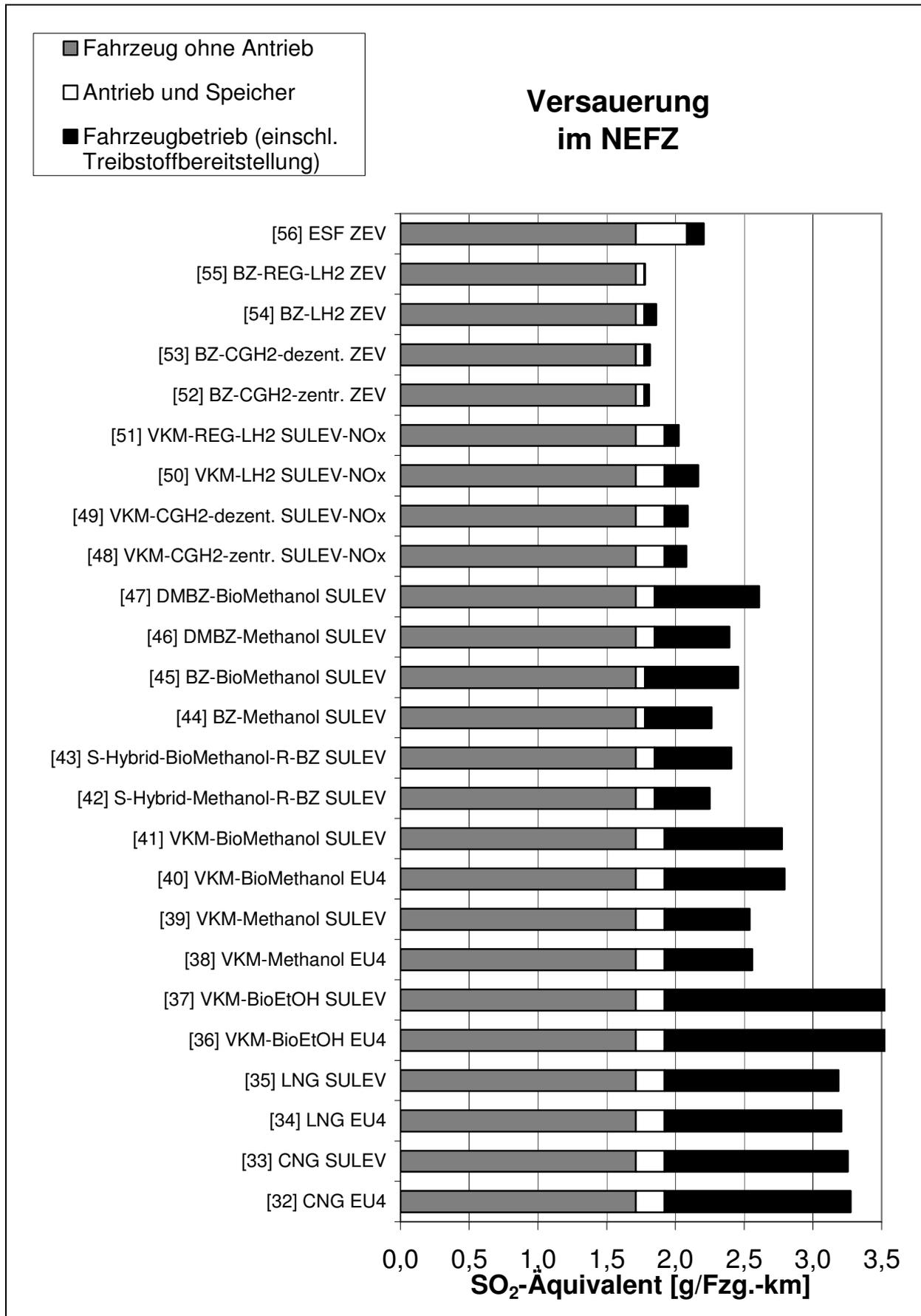


Abb. 4-17b: Versauerung durch Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

### Terrestrische Eutrophierung

Ökologische Prioritäten	ökologische Gefährdung	Abstand zum Ziel	Spez. Wirkungsbeitrag (Pkw)
	GROSS	GROSS	GROSS
Allgemeine ökologische Priorität	GROSS		

Für die Bewertung der terrestrischen Eutrophierung werden die  $\text{PO}_4^{3-}$ -äquivalenten Werte angegeben. Die folgenden [Abb. 4-18a](#) bis [Abb. 4-18b](#) fassen die Ergebnisse zusammen.

- Treibstoffe biogenen Ursprunges  
(Lfd.-Nr. 19-20, 36-37, 40-41, 43, 45, 47) besitzen sehr hohe Emissionen, die zur Eutrophierung beitragen. Bei RME sind diese Emissionen 4- bis 6-fach höher als für die Referenz im Benzinbetrieb, bei Bioethanol sind sie rund 3 mal höher und bei Biomethanol sind sie 2- bis 3-fach höher. Dies ist auf die Treibstoffherstellung zurückzuführen.
- Dieselfahrzeuge  
(Lfd.-Nr. 17, 24, 26, 28, 30) der Stufe EURO 4 verursachen wegen hoher  $\text{NO}_x$ -Emissionen im Fahrbetrieb noch doppelt so hohe Emissionen mit Eutrophierungspotential als die Referenz. Dies kann durch EURO 5 jedoch auf das Niveau der Referenz reduziert werden.
- Wasserstoff in Verbrennungskraftmaschinen  
(Lfd.-Nr. 48-51) erhöht die eutrophierend wirkenden Emissionen im Vergleich zur Referenz, auch beim Einsatz erneuerbarer Primärenergiequellen, um 30% bis 100%.
- Brennstoffzellenfahrzeuge  
(Lfd.-Nr. 42, 44, 46, 52-55) können die Eutrophierungsemissionen gegenüber der Referenz um 25% bis 50% reduzieren. Ausgenommen ist die Verwendung von Biomethanol.
- Elektrostraßenfahrzeuge  
(Lfd.-Nr. 56) können die Eutrophierungsemissionen gegenüber der Referenz allenfalls um 10% reduzieren.

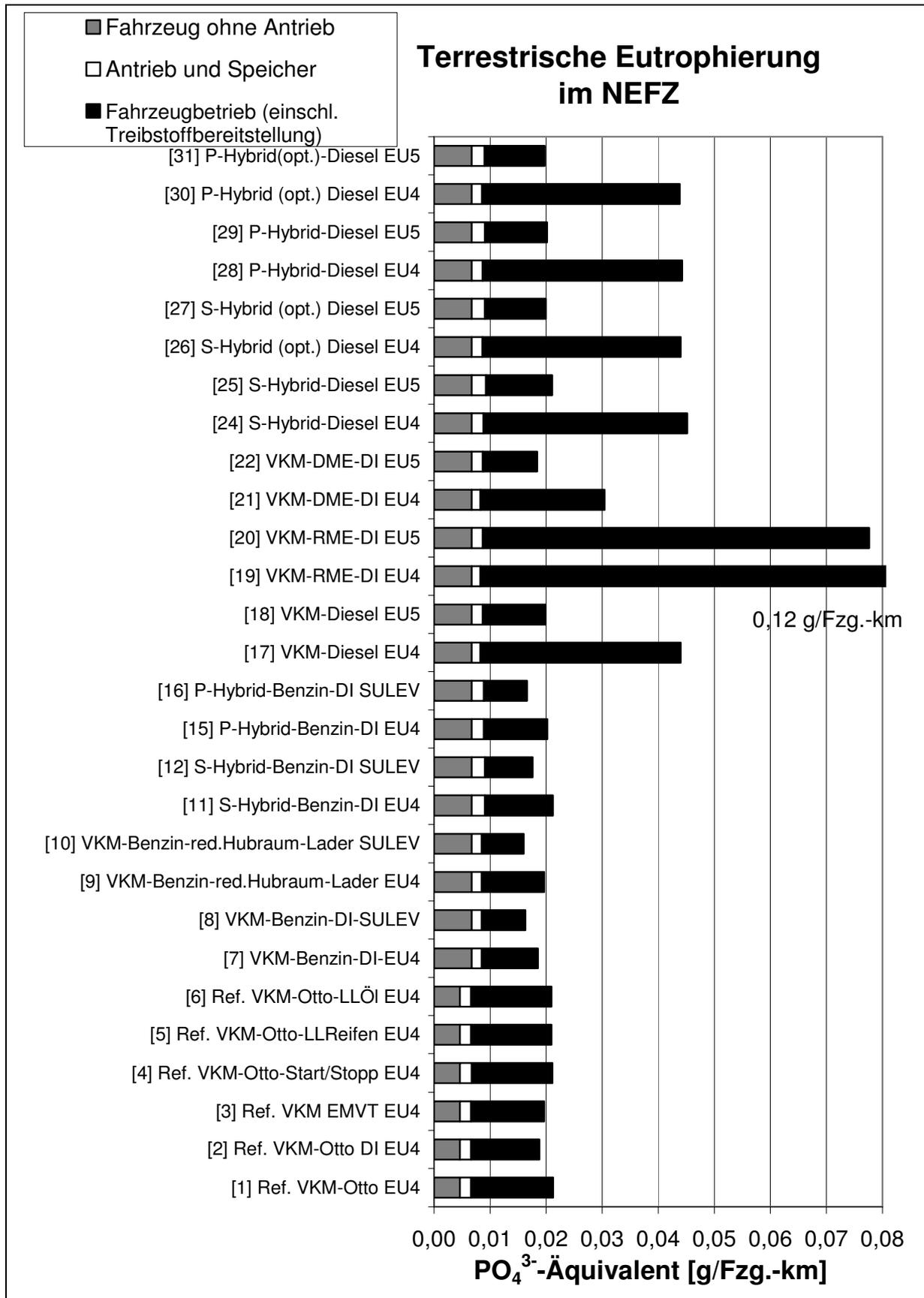


Abb. 4-18a: Terrestrische Eutrophierung für Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

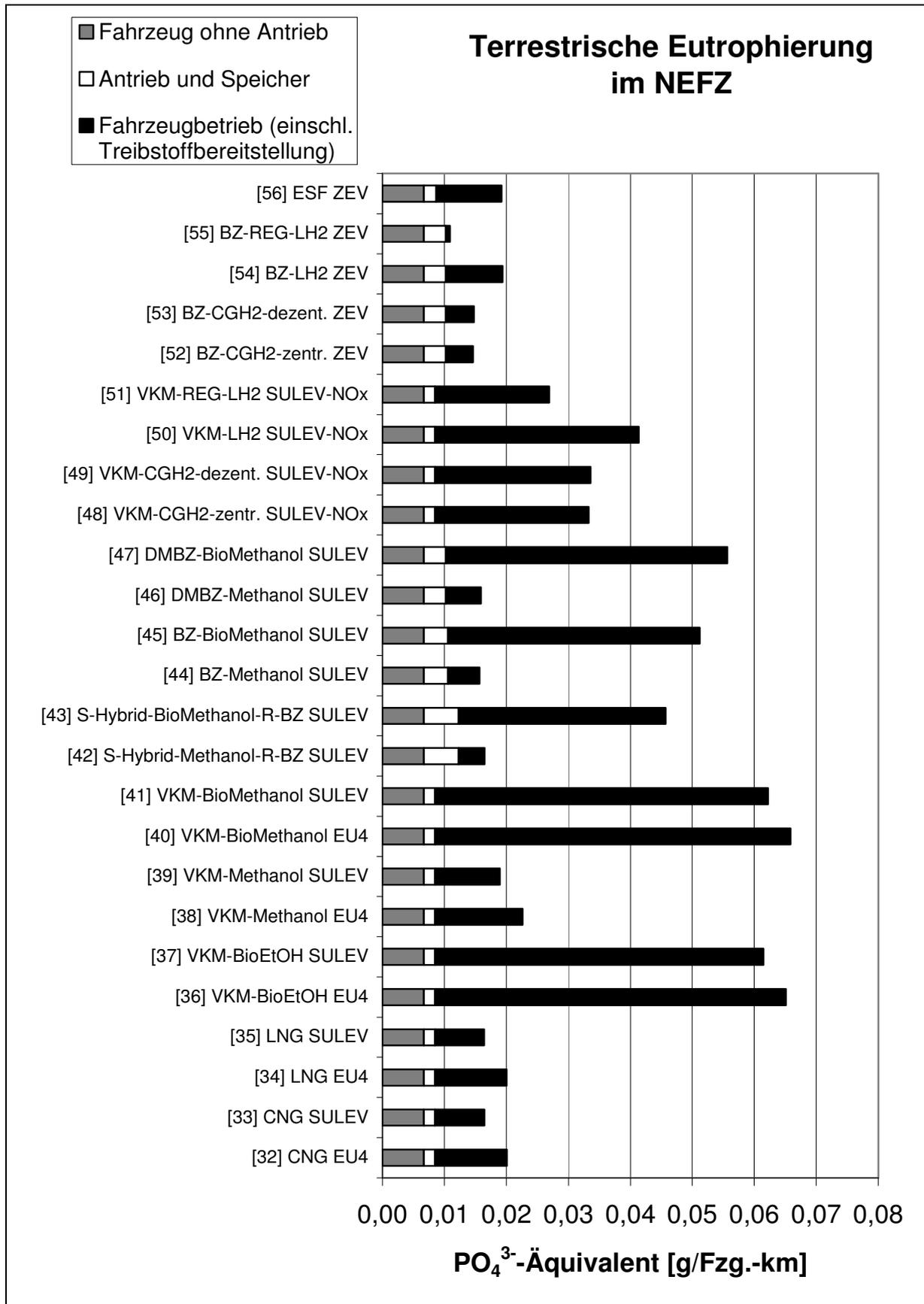


Abb. 4-18b: Terrestrische Eutrophierung für Pkw verschiedener Antriebsvarianten im NEFZ

*Flächenverbrauch*

Ökologische Prioritäten	ökologische Gefährdung	Abstand zum Ziel	Spez. Wirkungsbeitrag (Pkw)
	<b>SEHR GROSS</b>	<b>GROSS</b>	<b>GROSS</b>
Allgemeine ökologische Priorität	<b>GROSS</b>		

Der zeitbewertete Flächenverbrauch im fließenden Verkehr ist maßgeblich von der durchschnittlichen Geschwindigkeit und der Durchlassfähigkeit einer Straße abhängig. Für den ruhenden Verkehr ergibt sich ein Zusammenhang zur Fahrzeuggröße, dem Besetzungsgrad und der Abstelldauer. Die folgende Abb. 4-19 fasst die Ergebnisse zusammen, die für alle Fahrzeuge gleichermaßen gelten. Eine weitergehende Einordnung und Bewertung der Ergebnisse ist damit erst möglich, falls der Vergleich zu anderen Fahrzeugkategorien oder Verkehrsträgern erfolgt.

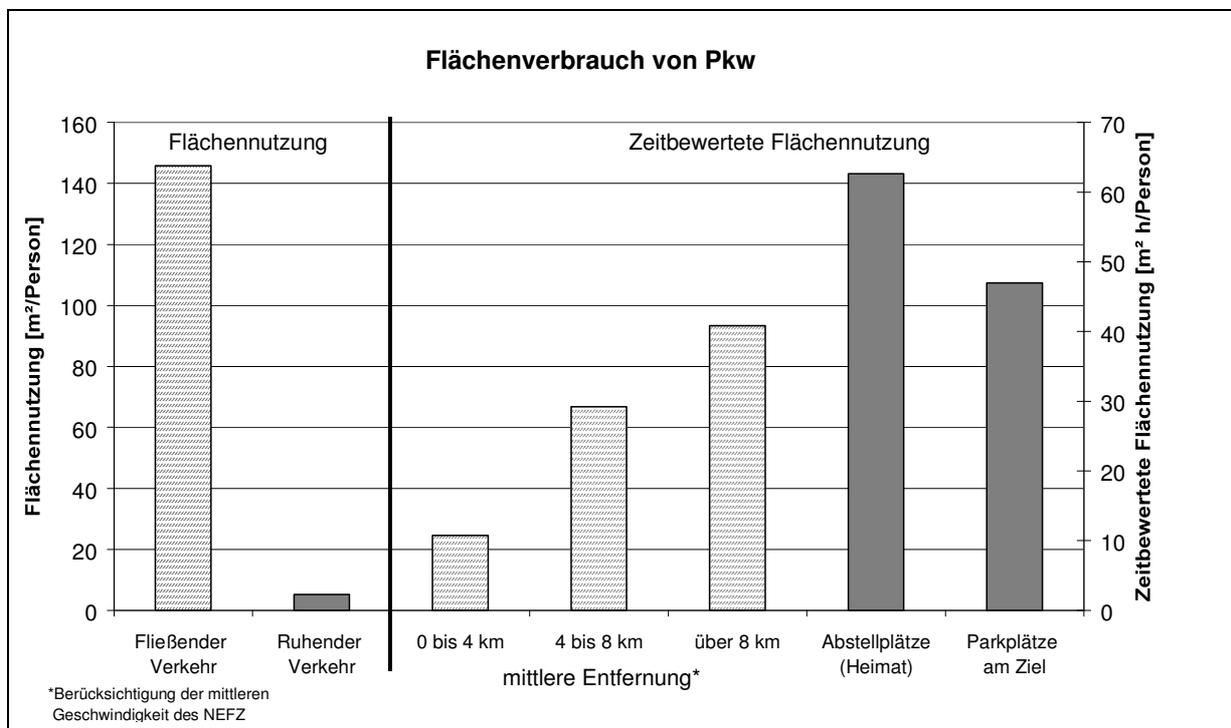


Abb. 4-19: Flächenverbrauch für alle Pkw mit wechselnden Antrieben im NEFZ

Lärmbelastung

Ökologische Prioritäten	ökologische Gefährdung	Abstand zum Ziel	Spez. Wirkungsbeitrag (Pkw)
	<b>SEHR GROSS</b>	<b>SEHR GROSS</b>	<b>SEHR GROSS</b>
Allgemeine ökologische Priorität	<b>SEHR GROSS</b>		

Die Lärmbelastungen werden anhand von Messungen in gesetzlichen Prüfverfahren, Modellberechnungen und Schätzungen zusammengefasst. Die folgende Abb. 4-20 zeigt die Ergebnisse der Lärmpegelminderungen für beschleunigte Vorbeifahrt aus 50 km/h, Konstantfahrt bei 30 km/h und Schätzungen für einen Mittelungspegel in einer städtischen zweispurigen Hauptverkehrsstraße (mit Asphaltdecke) bei einer angenommenen Durchfahrt von 1.000 Personen pro Stunde in Pkw mit einer durchschnittlichen Besetzung. Da die Ergebnisse unabhängig von den Herstellungsverfahren gleicher Treibstoffe und den Grenzwertstufen gelten und ausgehend vom Lärmpegel des Referenzfahrzeuges nur geringe Abweichungen darzustellen sind, werden diese zusammengefasst und als Differenz zum Referenzfahrzeug dargestellt.

- Beschleunigte Vorbeifahrt aus 50 km/h  
führt bei dem Fahrzeug zu Vorteilen, das mit rollwiderstandsarmen und lärmarmen Reifen ausgestattet ist (-2 dB(A)). Dieselantriebe weisen gegenüber der Referenz (69 dB(A)) keine Minderung auf. Die weiteren zukünftigen Fahrzeuge werden – unabhängig von ihrem Antrieb – mit einer Minderung um 1 dB(A) modelliert. Hier zeigt sich im Messverfahren der dominierende Einfluss des Rollgeräusches auf den Messwert.
- Konstantfahrt bei 30 km/h  
führt auch bei lärmarmen Antrieben zu signifikanten Vorteilen. Leichtlaufreifen und Elektrotraktionen führen zu Minderungen um 2 dB(A), zukünftige Verbrennungskraftmaschinen erreichen Minderungen um ein 1 dB(A), Dieselmotoren erreichen das Niveau heutiger Ottomotoren von 61 dB(A).
- Für den Mittelungspegel in einer städtischen Straße  
bei einer angenommenen Durchfahrt von 1.000 Personen pro Stunde in Pkw mit einer durchschnittlichen Besetzung von 1,3 Personen je Pkw ergeben sich folgende Ergebnisse. Dieselantriebe erreichen eine Minderung des Mittelungspegel (59 dB(A) für den Referenzfall) um 1 dB(A), sonstige Pkw mit zukünftigen Verbrennungsmotoren um 2 dB(A), die flächendeckende Nutzung von lärmarmen Leichtlaufreifen kann den Mittelungspegel um 3 d(B)A senken und Elektrotraktion im günstigsten Fall um 4 dB(A).

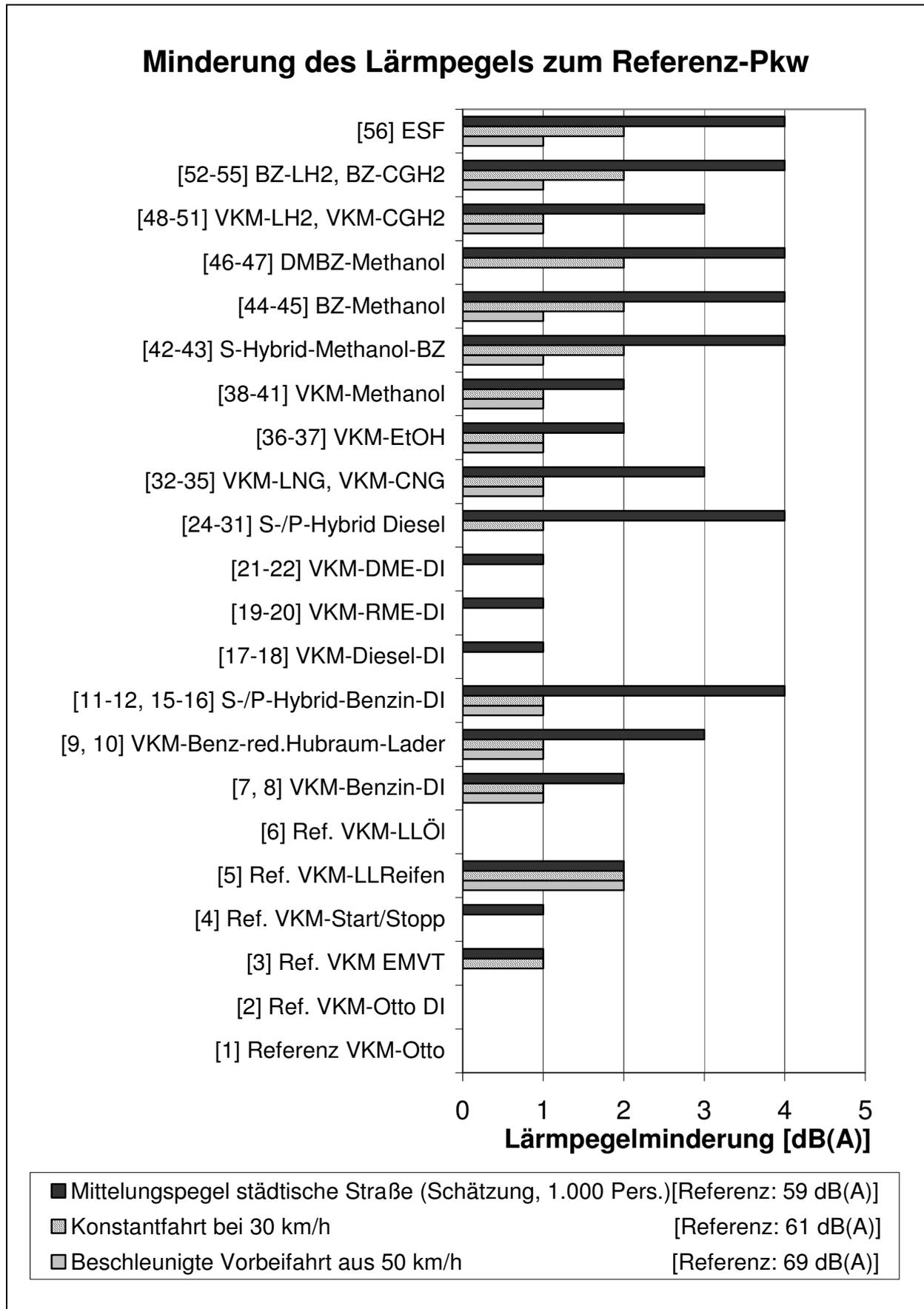


Abb. 4-20: Gegenüberstellung von Lärmpegelminderungen

### 4.3.7 Gesamtergebnisse der Umweltwirkungen

Ziel der abschließenden Bewertung ist eine Hierarchisierung der Ergebnisse in den Wirkungskategorien (Kapitel 4.3.5) nach ökologischen Prioritäten. Aus der Zusammenfassung der einzelnen ökologischen Prioritäten in Tab. 3-1, wird eine arithmetisch gemittelte allgemeine ökologische Priorität berechnet, die für die Umweltbewertung genutzt wird (Tab. 4-17). Aufbauend auf der allgemeinen ökologischen Priorität können die Ergebnisse in den Wirkungskategorien unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gewichtungen (Gewichtungsszenarien) bewertet werden.

Für die Gewichtungsszenarien empfiehlt sich ein Schwerpunktszenario, das die Treibhauswirkung neuer Antriebe überproportional bewertet (**CO<sub>2</sub>-Szenario**) und ein weiteres Szenario, das den Schwerpunkt auf die zu mindernden humantoxischen und kanzerogenen Emissionen setzt. Es wird **Humantoxizitätsszenario** genannt. Ein **1:1-Szenario** ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel beider Szenarien. Durch diese Schwerpunkte werden zwei Grenzen gesetzt, in deren Rahmen sich wegen der Prioritätensetzung alle grundsätzlichen Aussagen hinsichtlich der Umweltrelevanz und des daraus abzuleitenden Handlungsbedarfes bewegen, ohne die Ergebnisse der Gesamtheit der Wirkungskategorien zu vernachlässigen.

Tab. 4-17: Zusammenfassung der ökologischen Prioritäten unterschiedlicher Wirkungskategorien im Sektor Pkw-Verkehr

Wirkungskategorie	Allgemeine ökologische Priorität <sup>1)</sup>	Gewichtungs-Szenarien		
		CO <sub>2</sub>	Human-toxizität	1:1
1. Ressourcenbeanspruchung	GROSS	10%	10%	10%
2. Treibhauseffekt	SEHR GROSS	45%	15%	30%
3. Stratosphärischer Ozonabbau	GROSS	5%	5%	5%
4. Direkte Humantoxizität	SEHR GROSS <sup>2)</sup>	5%	15%	10%
4.1. Kanzerogenität	SEHR GROSS <sup>2)</sup>	10%	30%	20%
5. Direkte Ökotoxizität	GROSS <sup>2)</sup>	k.A.	k.A.	k.A.
6. Photochemische Oxidantienbildung	MITTEL	5%	5%	5%
7. Versauerung	GROSS	5%	5%	5%
8. Eutrophierung	GROSS	-	-	-
8.1. Aquatische Eutrophierung	GROSS	-	-	-
8.2. Terrestrische Eutrophierung	GROSS	5%	5%	5%
9. Naturraumbeanspruchung (Flächen)	GROSS	-	-	-
10. Lärm	SEHR GROSS <sup>2)</sup>	10%	10%	10%

<sup>1)</sup> Durchschnitt allgemeiner Prioritäten (Tab. 3-1)

<sup>2)</sup> Festlegung auf Basis der Ergebnisse in Kapitel 2.2.2

Die Bewertung erfolgt in einer Punkteskala von -10 bis +10 für die unterschiedlichen Wirkungskategorien in Abhängigkeit von der Emissionsminderung zur Referenz von 100% (10 Punkte) bis zu Emissionszunahmen von 100% und darüber hinaus (-10 Punkte). Für Lärmwerte könnten durch eine Minderung um 5 dB(A) bei beschleunigter Vorbeifahrt aus 50 km/h maximal 10 Punkte erreicht werden. Die folgenden Abb. 4-21a und Abb. 4-21b zeigen die Ergebnisse der Bewertung in unterschiedlichen Szenarien, deren Gewichtung ebenfalls in

Tab. 4-17 zusammengefasst sind. Die laufenden Nummern werden in den Abbildungen in eckigen Klammern angegeben.

- Diesel, RME und Benzin-DI der Grenzwertstufe EURO 4  
(Lfd.-Nr. 7, 11, 15, 17, 19, 21, 24, 26, 28, 30) zeigen Nachteile im Humantoxizitätsszenario und nur geringe Vorteile im CO<sub>2</sub>-Szenario gegenüber der Referenz. Diese Nachteile können sich erst durch die Grenzwertstufe EURO 5 (RME, Diesel) oder SULEV (Benzin) verringern. Dann erreicht der Diesel (EURO 5) deutliche Vorteile.
- Flüssigwasserstoff in Verbrennungsmotoren  
(Lfd.-Nr. 50) erreicht Vorteile im Humantoxizitätsszenario, verursacht jedoch hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen und Energieverluste. Diese Nachteile im CO<sub>2</sub>-Szenario können durch die Verwendung von Druckwasserstoff deutlich verringert werden.
- Benzin-DI, DME, Erdgas, Methanol und Ethanol  
(Lfd.-Nr. 8, 12, 16, 22, 33, 35, 37, 39, 41) der Grenzwertstufe SULEV oder EURO 5 (DME) erreichen bereits mit Verbrennungskraftmaschinen deutliche Vorteile gegenüber der Referenz in allen Szenarien. Komprimiertes Erdgas (CNG) sticht in der Gruppe dieser Treibstoffe besonders positiv hervor.
- Brennstoffzellenantriebe und batterieelektrische Fahrzeuge  
(Lfd.-Nr. 42-47, 52-56) erreichen in allen Szenarien mindestens das Niveau des Erdgasverbrennungsmotors (Brennstoffzelle mit Methanolreformer, batterieelektrisches Fahrzeug). Dieses Niveau kann durch den Einsatz von Wasserstoff nochmals deutlich verbessert werden. Das umweltgerechteste Fahrzeug ist der Brennstoffzellenantrieb mit Druckwasserstoff aus Erdgas oder erneuerbaren Energieträgern.
- Biokraftstoffe  
sind nicht grundsätzlich positiv zu beurteilen. Hohe humantoxische Emissionen bei RME im Abgasstandard EURO 4D können zu Nachteilen im Humantoxizitätsszenario gegenüber der Referenz führen. Ebenso hat Biomethanol gegenüber Methanol aus Erdgas Nachteile im Humantoxizitätsszenario. Unbestritten sind die Vorteile der Biokraftstoffe im CO<sub>2</sub>-Szenario.
- Ein Nullemissionsfahrzeug  
kann nicht identifiziert werden. Die Berücksichtigung von prozentualen Minderungen zeigt, dass die maximal erreichte Punktzahl bei 5,5 (55% Reduktion in Emissionsszenarien) von 10 erreichbaren Punkten (Nullemission) für den Brennstoffzellen-Pkw mit Wasserstoff aus erneuerbaren Energieträgern im CO<sub>2</sub>-Szenario liegt.

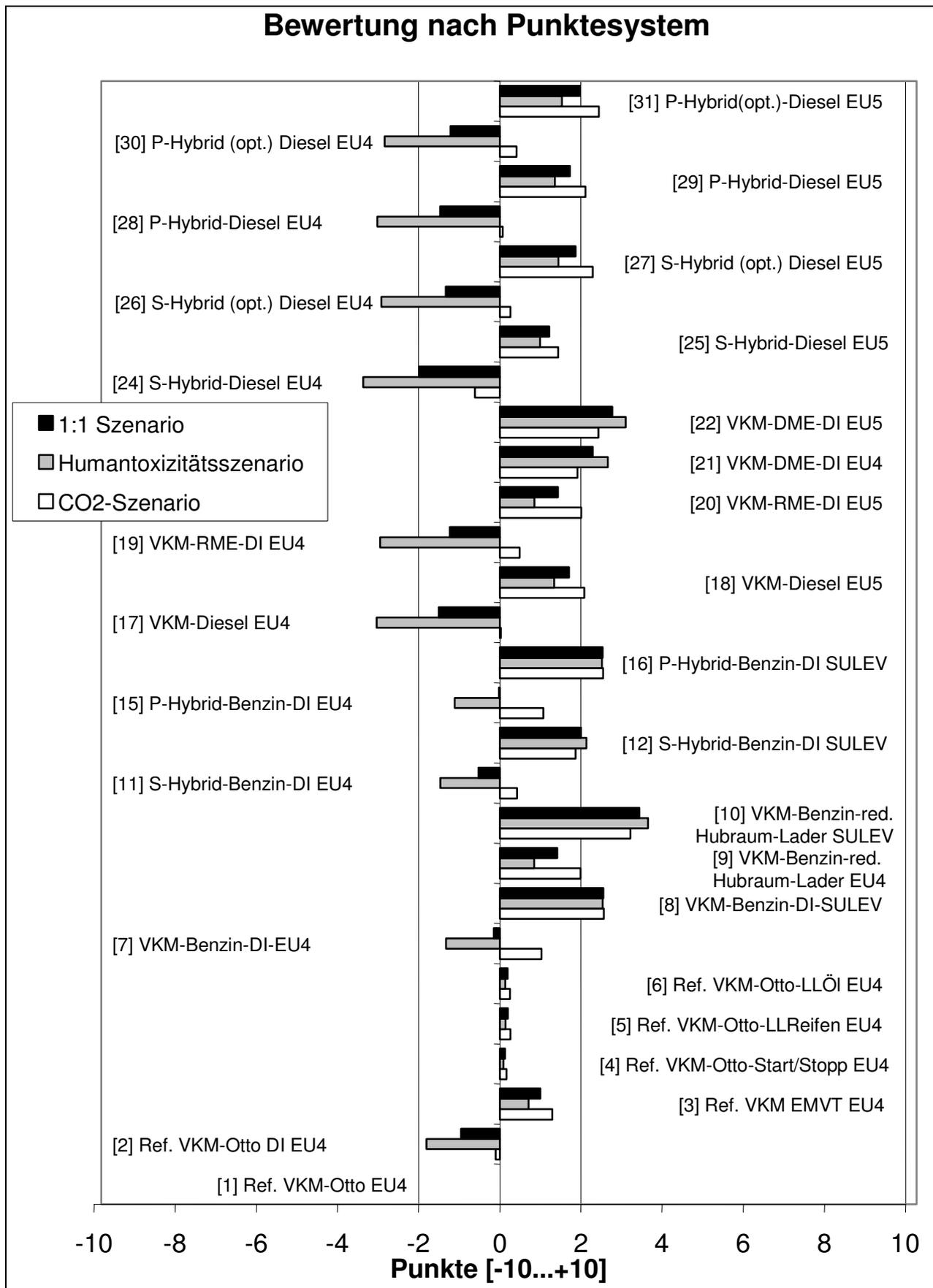


Abb. 4-21a: Punktesystembewertung für Pkw

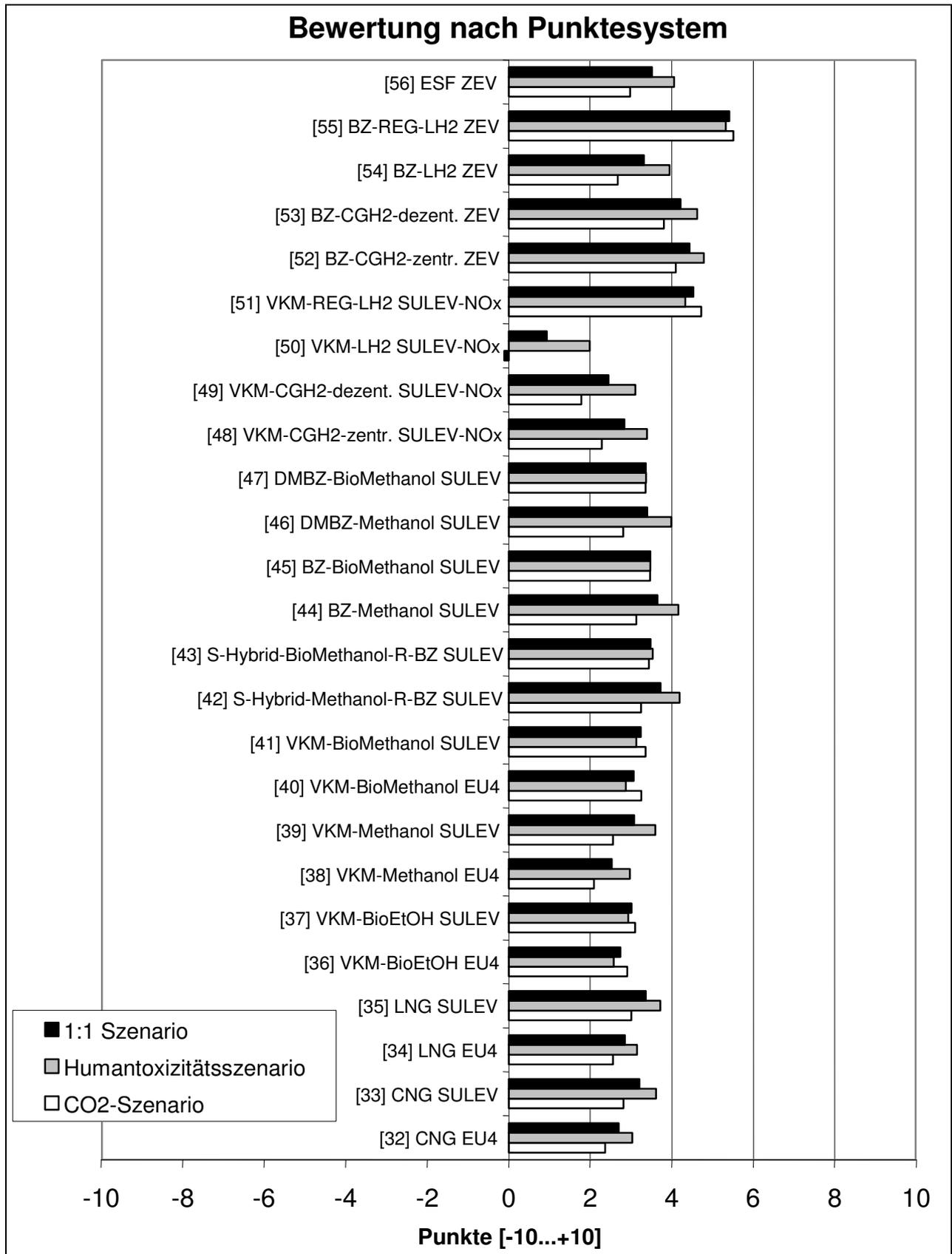


Abb. 4-21b: Punktesystembewertung für Pkw

#### 4.4 Ermittlung und Verknüpfung der kostenbezogenen Modelldaten

Nach der eingehenden Untersuchung der Umweltaspekte werden nun die Kostenaspekte der Pkw und der Pkw-Antriebe betrachtet. Tab. 4-18 fasst die auf der Basis von MS Excel entwickelten Modellteile zur Fahrzeugauslegung und zur Kostenermittlung zusammen.

Tab. 4-18: Modellteile und Ergebnisse zur Fahrzeugauslegung und zu Ermittlung der Herstellungskosten

Modellteil		Modelltyp
• Auslegung und Kosten (einschl. Ergebnisse zu Treibstoffkosten)		Kosten/Verbrauch
• Treibstoffkosten		Kosten
Eingangsdaten		Ergebnisdaten
• Spezifische Bauteildaten (Massen, Kosten)	• Pkw-Modelldaten	
• Modellierung der Gesamtmasse und der Kosten	• Antriebskosten	
• Modellierung der Verbrauchswerte	• Treibstoffkosten	
• Treibstoffkosten		
• Devisenkurse		

In dieser Arbeit werden ausschließlich die Herstellungs- und die Betriebskosten berücksichtigt. Preise, betriebswirtschaftliche Gewinne, sowie externe Kosten werden nicht einbezogen. Am Beispiel der Wirtschaftlichkeitsrechnung werden die Unterschiede dargestellt (Tab. 4-19).

Tab. 4-19: Gegenüberstellung der Bilanzgrößen der Wirtschaftlichkeitsrechnung von Pkw für den Ansatz der Betriebswirtschaftlichkeitsrechnung und der Vermeidungskosten

Betriebswirtschaftlichkeitsrechnung		Kostenansatz für Vermeidungskosten	
<b>Wertverlust</b>	• Abschreibung Anschaffungspreis <sup>1)</sup> einschl. Fahrzeugüberführung, Zulassung und Kennzeichen	<b>Herstellungskosten</b>	• Berücksichtigung der Lebensdauer • Bilanzgrenze abhängig von den Vergleichssystemen
<b>Fixkosten</b>	• Kfz-Steuer • Versicherung • Parken, Haupt-, Abgasuntersuchung		
<b>Betriebskosten</b>	• Kraftstoffkosten • Wagenwäsche, Pflege	<b>Betriebskosten</b>	• Kraftstoffkosten
<b>Werkstatt</b>	• Kosten für Basismodelle • Reifen	<b>Werkstatt</b>	• Wartungskosten • Reifen

<sup>1)</sup> Der Anschaffungspreis setzt sich aus dem Grundpreis und einer Pauschale für marktübliche Extras zusammen.

Im Folgenden werden die Kostengrößen der Treibstoffe (Kapitel 4.4.1), der Antriebe und Fahrzeuge (Kapitel 4.4.2) und eine Zusammenfassung aller Kosten (Kapitel 4.4.3) vorgelegt.

#### 4.4.1 Kosten der Treibstoffherstellung

In den Kostenbilanzen werden die Bereitstellungskosten der Treibstoffe verwendet. Diese Kosten berücksichtigen immer die steuerfreien Treibstoffkosten, um Verzerrungen der Ergebnisse durch den Einfluss von besteuerten Treibstoffen gegenüber den zur Zeit unbesteuerten Energieträgern auf das Ergebnis auszuschließen.

Für die Erhebung der Daten wurden umfassende Literaturrecherchen durchgeführt, um die verwendeten Treibstoffkosten zu verifizieren. Eine Zusammenfassung der ausgewerteten Quellen findet sich im Anhang in Tab. 7-47a-c. Da die in einem überschaubaren Zeithorizont von 10-15 Jahren gängigsten Verfahren berücksichtigt werden, ergeben sich aus der Quantifizierung der Bereitstellungskosten zuverlässige Ergebnisse. Eine Ausnahme bilden in diesem Zusammenhang Produktionsverfahren für Treibstoffe aus erneuerbaren Energieträgern, deren Herstellung maßgeblich von einem großindustriellen Herstellungsverfahren abhängen wird. Dies gilt teilweise auch für Kostendaten aus den USA, da dortige Primärenergiekosten ein unterschiedliches Niveau aufweisen können. Bei Strom für Haushalte und Kleinverbraucher werden ebenfalls die steuer- und abgabenfreien Arbeitspreise unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen jährlichen Preissteigerungsrate von 1,4% berücksichtigt.

#### 4.4.2 Kosten der Herstellung der Antriebe und Fahrzeuge

Auf Grundlage der Bauteile und Bauteilgruppen aus ([134], [135]) werden zunächst die Gewichte für die Eingangsdaten der Fahrzeugmodellierung und die Verbrauchswerte ermittelt. Aufbauend auf dieser Struktur (Abb. 4-7), die nach den Anforderungen der unterschiedlichen Antriebsvarianten erweitert ist, wurden die Kosten der Bauteile oder Bauteilgruppen ermittelt. Im Folgenden wird ein Überblick über die Vorgehensweise gegeben.

##### 4.4.2.1 Antriebsvergleiche

Die Bilanzierung der Kosten der unterschiedlichen Antriebsvarianten beinhaltet alle relevanten Größen des Antriebsstranges und schließt die Kosten der Verbrennungsmotoren, der Generatoren, der Elektronik, der Kühler, der Getriebe, der Kupplung, der Speichersysteme und der Abgasanlagen in den Emissionsstufen EURO 4, EURO 5 oder SULEV ein. Die wesentlichen Datengrundlagen für die Kosten der Antriebsstränge werden aus [64], [65], [179], [180] abgeleitet und durch Angaben weiterer Primärquellen (z.B. [171]-[175]) und Sekundärquellen, sowie durch persönliche Informationen verifiziert. Die wesentlichen verwendeten Quellen sind im Anhang in Tab. 7-30 zusammengefasst. Beispielhaft werden einige Kostenstrukturen von Antrieben höherer Leistung mit Ottomotor (Herstellungskosten) und mit Brennstoffzelle und Methanolreformer (Zielkosten der Herstellung) im Anhang in Tab. 7-31 und Tab. 7-32 dargestellt. Einige Kostendaten werden teilweise mit Daten höherer Belastbarkeit angepasst.

Alle Daten sind in der Regel so aufbereitet, dass spezifische Faktoren (Kosten je Leistungseinheit oder Produktionseinheit) direkt verwendet werden oder aus absoluten Kostenangaben spezifische Faktoren abgeleitet werden können.

#### 4.4.2.2 Speichervergleich

Flüssige Treibstoffe (Benzin, Diesel, Ethanol, Methanol) werden bei Umgebungsdruck und Umgebungstemperatur gespeichert, während gasförmige Treibstoffe unter Druck (LPG, CNG, CGH<sub>2</sub>) oder flüssig bei tiefen Temperaturen (LNG, LH<sub>2</sub>) gespeichert werden. Elektrische Energie wird im Kraftfahrzeug, sofern sie nicht in geringen Mengen als mechanische Energie zwischengespeichert wird (z.B. Schwungradspeicher), elektrochemisch in Batterien oder in Ultrakondensatoren gespeichert.

Die in der Bilanzierung berücksichtigten Kostendaten, die besonders durch die Kosten der elektrochemischen Energiespeicher beeinflusst werden, sind gemeinsam mit den gewichtsbezogenen Daten in [Tab. 7-33](#) und [Tab. 7-35](#) (Anhang) zusammengefasst. Ferner werden bei den elektrochemischen Batteriespeichern die Einflussfaktoren auf die Lebensdauer der Batterien berücksichtigt. Die zu berücksichtigende Lebensdauer der Batterie hängt von der Dimensionierung der Batterie (Reichweite und Verbrauch des Fahrzeuges im batterieelektrischen Betrieb) und den Eigenschaften der Batterie (Zyklusfestigkeit) ab (vgl. Anhang, [Abb. 7-27](#)). Da die verwendete Batterie für das batterieelektrische Fahrzeug eine Nickel/Metallhydrid Batterie ist und die Lebensdauer aller Fahrzeuge bei einer Jahresfahrleistung von 12.000 km [83] mindestens bei 10 Jahren liegen soll, wird davon ausgegangen, dass kein zusätzlicher Batteriewechsel erforderlich sein wird.

#### 4.4.2.3 Fahrzeugkarosserie

Für die Herstellung der gesamten Fahrzeugkarosserie ist eine nach Materialeinsatz und Herstellungsverfahren differenzierte Untersuchung der Kosten, ähnlich wie dies für die Antriebsvarianten erfolgt ist, nur dann sinnvoll und angebracht, sofern werkstoffspezifische Eigenschaften von Karosserie- und Fahrwerksbauteilen untersucht und Kosten-Nutzen-Aspekte verglichen werden sollen. Der Schwerpunkt des in dieser Arbeit entwickelten Modells liegt in der Bewertung der antriebs- und treibstoffspezifischen Eigenschaften. Dennoch wird im Zuge der Modellierung bereits eine Struktur verwendet, die es ermöglicht, dass zu einem späteren Zeitpunkt diese Kostendaten eingefügt werden können (vgl. [Abb. 4-7](#)).

Zunächst werden die reinen Herstellungskosten – ohne Montage – auf der Basis von Stahlwerkstoffen herangezogen. Ein internationales Konsortium aus 33 Stahlunternehmen hat verbrauchsoptimierte Fahrzeugkonzepte der unteren Mittelklasse (dreitüriger Kleinwagenklasse-Pkw) und der Mittelklasse (viertüriges Stufenheckmodell der Mittelklasse) entwickeln lassen, die bereits heute weitreichende Sicherheitsstandards des Euro-NCAP (5 Sterne) erfüllen. Im Auftrag des Stahlkonsortiums hat Porsche Engineering Services, Inc., USA, mit heute verfügbaren mo-

dernsten Konstruktions- und Simulationstechniken Konzepte für diese zwei stahlintensiven Fahrzeuge realisiert [233].

Nach den durchgeführten neutralen Kostenanalysen sind so gefertigte moderne Leichtbaufahrzeuge in Großserie nicht teurer als die Herstellung konventioneller Fahrzeuge. Die Herstellungskosten für das Fahrzeug ohne Antriebsstrang eines derartigen Autos liegen bei rund 5.900 € für ein Fahrzeug der Golf-Klasse. Diese Ergebnisse decken sich mit Angaben in [65], aus denen die karosseriebezogenen Fahrzeugkosten der Mercedes A-Klasse ohne Antrieb in Höhe von 5.200-5.700 € abgeleitet werden können. Dabei sind teilweise moderne Konstruktionselemente aus [233] unberücksichtigt. Auch eine einfache Plausibilitätskontrolle der beiden Quellen ergibt ein übereinstimmendes Verhältnis der Antriebskosten zu den Fahrzeugkosten von

- 28:72 für Ottofahrzeuge und  
(61 kW-Antrieb in [233], 75 kW-Antrieb in [65])
- 34:66 für Dieselfahrzeuge.  
(54 kW-Antrieb in [233], keine Angabe der Leistung in [65])

Auch in [64] werden Herstellungskosten für Chassis und Karosserie anhand einer stark vereinfachten Schätzung mit 3.780 US\$ angegeben, die sich tendenziell mit den o.g. Angaben in [233] für die fortschrittliche Leichtbaukarosserie (4.550 US\$) decken.

Die Randbedingungen sind im Anhang, Tab. 7-43 zusammengefasst und werden grundsätzlich auf alle untersuchten Fahrzeuge übertragen. Eine darüber hinausgehende Aufstellung der relativen Gewichtsreduktionen und Kosten von Materialien für den Karosserieleichtbau sind im Anhang, Tab. 7-44 zusammengefasst.

#### 4.4.2.4 Abgasminderungssysteme

In der Regel werden die Mindestanforderungen der Abgasgesetzgebungen nicht ohne Abgasnachbehandlung eingehalten. Während die Abgasemissionen von stöchiometrisch betriebenen Ottomotoren durch niedrige Rohgasemissionen und eine Optimierung der Kaltstartemissionen reduziert werden, liegt der Schwerpunkt bei den unter Luftüberschuss betriebenen Motorkonzepten (z.B. Benzin-Direkteinspritzer, Diesel) in der Minderung der im Magerbetrieb auftretenden Stickstoffoxidemissionen durch Speicherkatalysatoren und stöchiometrische Betriebsstrategien oder katalytische Reduktion. Minderungssysteme zur Partikelreduktion werden beim Abgasstandard EURO 4 in der untersuchten Fahrzeugklasse nicht erforderlich sein. Für den Abgasstandard EURO 5 werden Minderungssysteme für Partikel und Stickstoffoxide obligatorisch sein.

Relevante Abgasminderungssysteme, deren Minderungspotentiale und Kosten werden in [237] umfassend erläutert und im Anhang in Tab. 7-45 und Tab. 7-46 zusammengefasst. Sofern diese Abgasminderungssysteme im Zuge des entwickelten Modells berücksichtigt werden, finden diese Kennwerte Anwendung.

Die folgende Tab. 4-20 stellt beispielhaft die Randbedingungen bei der Ermittlung der Mehrkosten von Ottomotoren der Grenzwertstufen EURO 2, EURO 4 und SULEV gegenüber. Die Ergebnisse der detaillierten Berechnungen decken sich mit einer Abweichung von -6% sehr gut mit den Werten in [65] für die gesamte Abgasanlage. Ferner liegen die von [51] für den kalifornischen Markt ermittelten Kosten zur Einhaltung der SULEV Grenzwerte deutlich, rund 50%, unter den für das Konzept der Volkswagen AG [286] ermittelten Kosten. Dies liegt maßgeblich an der aus Sicht der Volkswagen AG notwendigen Sekundärluftpumpe und an den für die Abgasrückführung angesetzten Kosten aus [237], die nach Ansicht des California Air Resources Board (CARB) für SULEV-Pkw nicht berücksichtigt werden müssten.

Unsicher bleibt, ob die Kosten der internen Abgasrückführung durch den in der Praxis umgesetzten Nockenwellenversteller tatsächlich den realen Herstellungskosten entsprechen oder in der Praxis niedriger sein könnten. Frühere eigene Kostenschätzungen zu SULEV-Konzepten in [244] auf der Basis des ersten SULEV-Pkw der Firma Honda [109] und auf der Basis veröffentlichter Daten in [237] belegen mit Mehrkosten von 200-300 € gegenüber einem EURO 2-Konzept eine sehr gute Korrelation zu den Daten des Volkswagen-Konzeptes, die daher für diese Untersuchung verwendet werden.

Tab. 4-20: Kosten für Abgassysteme an Ottomotoren

Systemkomponente	Quellen	EURO 2	EURO 4	SULEV	SULEV
		[65], [237]	[65], [237]	(Konzept VW) [65], [237], [286]	(CARB) [51]
Abgasanlage		65 €	65 €	65 €	65 €
Vorkatalysator		-	17 €	46 €	17 €
Hauptkatalysator		60 €	71 €	71 €	85 €
Höhere Kat.-Beladung, verbesserter Washcoat		-	-	28 €	28 €
Thermisch isolierter Abgaskrümmmer		-	23 €	23 €	23 €
Lambda Sonde 1		11 €	11 €	11 €	11 €
Lambda Sonde 2		-	11 €	11 €	11 €
Lambda Sonde 3		-	-	11 €	-
<i>Sekundärluftpumpe</i>		-	-	57 €	-
<i>Maßnahmen für verbesserte (interne) AGR</i>		-	-	36 €	-
Verkürzter Motorstart, Anlasseroptimierung		-	-	-	11 €
Sonstige Motormodifikationen zur Brennverlauf- optimierung (z.B. Injektoren, Zündkerzen)	}	-	-	11 €	11 €
„Luftunterstützte“ Kraftstoffeinspritzung (Leer- laufoptimierung durch Luftventiladapter)	}	-	-	-	9 €
Zylindergenaue Kraftstoffkontrolle (Softwareoptimierung)	}	-	-	-	-
Zündung nach Spät bei Kaltstart (Softwareoptimierung)	}	-	-	-	-
<b>Summe</b>		<b>136 €</b>	<b>199 €</b>	<b>371 €</b>	<b>272 €</b>
<b>Mehrkosten zum Stand EURO 2</b>			62 €	235 €	136 €
<b>Mehrkosten zum Stand EURO 4</b>			-	173 €	73 €

Für Benzin-Direkteinspritzer können beim EURO 4-Konzept auf der Basis von [282] Kosten angesetzt werden, die abhängig von den Kostenschätzungen in [237] mit etwa 200 € auf dem gleichen Niveau der EURO 4 Otto-Pkw beginnen und bis zu 280 € reichen.

Wegen fehlender veröffentlichter Konzepte für EURO 5-Diesel-Pkw kann eine vergleichbare Tiefe bei der Schätzung der Kosten für die Abgasnachbehandlung der Dieselmotoren nicht erreicht werden. Stattdessen erhöht sich die Variantenvielfalt der zur Verfügung stehenden Abgasminderungssysteme zur NO<sub>x</sub>- und Partikelminderung deutlich (Tab. 4-21). Die durchschnittlichen Kosten für das komplette Abgassystem der EURO 5-Diesel-Pkw werden demnach bei 360 bis 420 € liegen, um den Stand EURO 5 zu erreichen. Sollte ein kombinierter DeNO<sub>x</sub>/Partikelfilter (vgl. Abb. 4-5) zum Preis von 150 € verfügbar sein und die notwendigen hohen NO<sub>x</sub>-Minderungsraten erreichen, könnten die Systemkosten nochmals um etwa 120 € niedriger liegen.

Die Gegenüberstellung zeigt außerdem, dass mit der Grenzwertstufe EURO 5 in Europa der zusätzliche Aufwand der Abgasreduktion bei Dieselmotoren gegenüber dem Abgasnachbehandlungssystem der Ottomotoren bei rund 200 € liegen wird.

Tab. 4-21: Bandbreite der Kosten für Abgassysteme an Dieselmotoren (eigene Berechnungen nach [237])

Systemkomponente	EURO 2	EURO 4	EURO 5-Konzepte							
			PM-Filter, DeNO <sub>x</sub>		Zeolith, DeNO <sub>x</sub>		Zeolith, SCR		DeNO <sub>x</sub> /PM-Filterkombination	
			min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Abgasanlage	65 €	65 €	65 €	65 €	65 €	65 €	65 €	65 €	65 €	65 €
Oxidationskatalysator	61 €	61 €	17 €	17 €	-	-	-	-	-	-
Höhere Oxidationskatalysatorbeladung	-	18 €	18 €	18 €	-	-	-	-	-	-
SCR-Katalysator einschl. Dosiereinheit	-	-	-	-	-	-	139 €	153 €	-	-
Partikelfiltersystem	-	-	153 €	307 €	-	-	-	-	-	-
Zeolith Katalysator mit Reduktionsmittel	-	-	-	-	128 €	153 €	128 €	153 €	-	-
DeNO <sub>x</sub> -Katalysator	-	-	77 €	102 €	77 €	102 €	-	-	-	-
DeNO <sub>x</sub> -/Partikelminderungs-Katalysator	-	-	-	-	-	-	-	-	128 €	153 €
Verbesserung der Brennraumgeometrie	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erhöhung des Einspritzdruckes (teilw. nicht quantifizierbar)	-	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Verbesserte Abgasrückführung	-	-	36 €	46 €	36 €	46 €	46 €	46 €	46 €	46 €
<b>Kompletter Abgasstrang</b>	<b>126 €</b>	<b>145 €</b>	<b>366 €</b>	<b>555 €</b>	<b>305 €</b>	<b>367 €</b>	<b>378 €</b>	<b>418 €</b>	<b>239 €</b>	<b>264 €</b>
Kompletter Abgasstrang (mit Austauschfilter, 80.000km)					382 €	459 €	455 €	510 €	316 €	356 €
<b>Mehrkosten zum Stand EURO 2</b>		18 €	240 €	429 €	179 €	240 €	252 €	292 €	113 €	138 €
<b>Mehrkosten zum Stand EURO 4</b>		-	221 €	411 €	161 €	222 €	234 €	273 €	94 €	120 €

#### 4.4.2.5 Zusammenfassung der Antriebs- und Speicherkosten

Die Zusammenfassung der Gesamtergebnisse für die Antriebe, einschließlich der Speicher, findet sich in den folgenden [Abb. 4-22a](#) und [Abb. 4-22b](#).

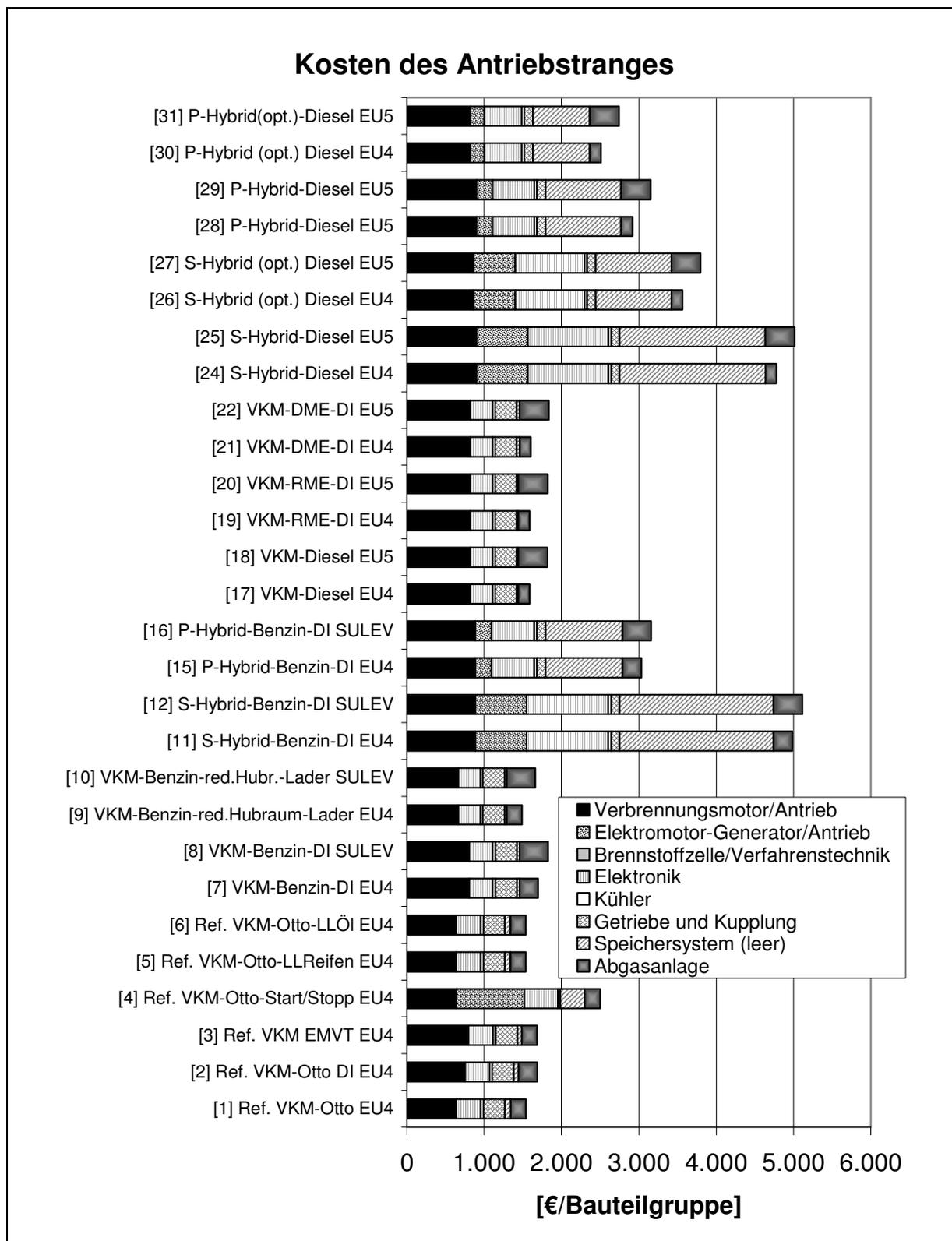


Abb. 4-22a: Kosten der Antriebe und Speicher für Pkw

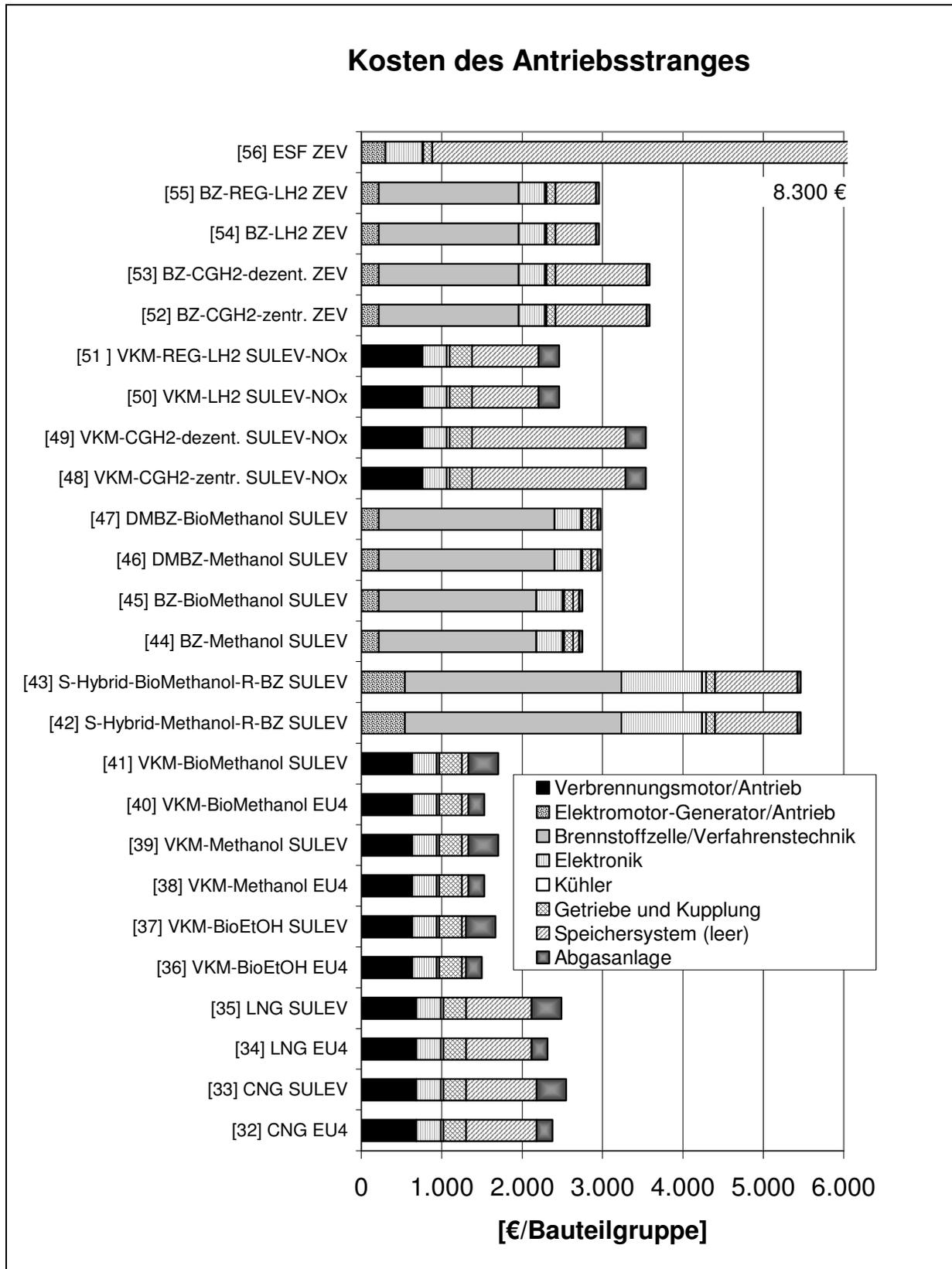


Abb. 4-22b: Kosten der Antriebe und Speicher für Pkw

### 4.4.3 Ergebnisse der Kostenbilanz

Die Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der Kostenbilanzen finden sich in den folgenden [Tab. 4-22a](#) bis [Tab. 4-22c](#). Im Vergleich zum Referenzantrieb, bezogen auf eine Lebensdauer von 10 Jahren bei einer jährlichen Laufleistung von 12.000 km in Anlehnung an Erhebungen für das Jahr 2000/2001 [83] sowie unter Berücksichtigung von Herstellungs- und Treibstoffkosten, lassen sich folgende Aussagen ableiten.

- Die im Vergleich zur Referenz günstigsten Antriebsvarianten basieren auf Ottomotoren. Der kleinvolumige, hoch aufgeladene Motor kann ebenso kostenneutral umgesetzt werden, wie die Verwendung flüssiger alternativer Energieträger (Methanol, Ethanol, DME). RME befindet sich an der Schwelle zu höheren Kosten als der Referenz-Pkw. Dies ist mit den Treibstoffkosten zu erklären. Der im Vergleich zur Referenz leistungärmere Dieselantrieb (EURO 4) kann mindestens kostenneutral umgesetzt werden. Mit der Grenzwertstufe EURO 5 (Diesel) und SULEV (Benzin-DI, Ottomotoren) steigen die Mehrkosten der Antriebe um knapp 20% an. Insgesamt ist unter Berücksichtigung der geringeren Kraftstoffkosten immer noch eine Kostenneutralität zum Referenz-Pkw gewährleistet.
- Hybridvarianten erreichen zwar antriebseitige Mehrkosten von 90-230%. Unter Berücksichtigung der weiteren Fahrzeug- und Treibstoffkosten können aber diese Mehrkosten zumindest für das optimierte Parallelhybridsystem (Diesel, angepasste Auslegung der Batteriegröße) vollkommen ausgeglichen werden. Die Mehrkosten der Stirlingantriebe liegen um den Faktor 12 über den Referenzantrieben. Wegen fehlender belastbarer umweltbezogener Daten musste auf eine vollständige Bilanzierung verzichtet werden.
- Brennstoffzellenantriebe werden unter sehr optimistischen Randbedingungen und unter Berücksichtigung von Zieldaten bilanziert. Dadurch ergeben sich für den Antrieb Mehrkosten von 80-250% gegenüber der Referenz. Elektrofahrzeuge liegen wegen der Batteriekosten und der Batteriegröße um den Faktor 4 über dem Referenz-Pkw. Auch bei Erdgas- und Wasserstoffverbrennungsmotoren ergeben sich für den Antriebsstrang Mehrkosten um 60%, auch wegen der Speicherkosten.
- Unter Berücksichtigung der Fahrzeug- und der Antriebskosten, sowie der Verbrauchsvorteile und der Treibstoffkosten, handelt es sich bei optimierten Benzin- und Dieselmotoren um die attraktivsten Antriebsvarianten mit Einsparungen um 10% gegenüber der Referenz. Diese Vorteile werden auch noch teilweise genutzt, falls Methanol oder Erdgas in Verbrennungskraftmaschinen genutzt wird. Die Brennstoffzellenvarianten verursachen trotz der hohen Antriebskosten (siehe oben) nur moderate Mehrkosten von 10-25%, wenn die Gesamtkostenbilanz berücksichtigt wird. Die Zielkosten der Brennstoffzellenantriebe orientieren sich an den Kosten von Dieselantrieben.
- Hohe Kosten ergeben sich für Wasserstoffverbrennungsmotoren mit Gesamtkosten (einschl. Fahrzeug, Treibstoff), die 30-40% über der Referenz liegen. Bei Elektroantrieben liegen die Mehrkosten bei 80%.

Tab. 4-22a: Zusammenfassung der Kostendaten der Pkw

Lfd.-Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 <sup>1)</sup>	14 <sup>1)</sup>	15	16	17	18	19	
Fahrzeug-Nummer	1	2	3	4	5	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13	
Treibstoff-Nummer	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	10	
Abkürzung																				
Treibstoff																				
Abgasmindeststandard																				
	Otto	Ref. VKM-Otto DI	Ref. VKM-EMVT	Ref. VKM-Start/Stopp	Ref. VKM-LLReifen	Ref. VKM-LLÖl	Ref. VKM-zin-DI	VKM-Ben-zin-DI	VKM-Ben-zin-DI	VKM-Benz Hubredlader	VKM-Benz Hubredlader	S-Hybrid-Benzin-DI	S-Hybrid-Benzin-DI	S-Hybrid-Ben-Stirling	S-Hybrid-Ben-Stirling	P-Hybrid-Benzin-DI	P-Hybrid-Benzin-DI	VKM-Diesel	VKM-Diesel	VKM-RME-DI
	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Diesel	Diesel	RME
	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4D	EURO 5	EURO 4D
<b>Zusammenfassung der Kostendaten</b>																				
Antriebsstrang	€	1540	1685	1684	2499	1537	1537	1696	1826	1489	1661	4985	5115	20430	20430	3031	3161	1585	1819	1586
Fahrzeug ohne Antrieb	€	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906
Gesamtfahrzeug	€	7446	7591	7590	8405	7443	7443	7602	7732	7395	7567	10891	11021	26336	26336	8937	9067	7491	7725	7492
Treibstoff (Durchschnitt, Ø)	Ct./km	1,4	1,2	1,1	1,4	1,3	1,3	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	1,3
Treibstoff (NEFZ)	Ct./km	1,5	1,3	1,1	1,4	1,4	1,4	0,8	0,8	0,7	0,7	0,9	0,9	0,6	0,6	0,8	0,8	0,7	0,7	1,6
Gesamtsumme (Fzg. + Ø)	Ct./km	7,6	7,6	7,5	8,4	7,6	7,5	7,1	7,2	6,8	7,0	9,9	10,0	22,6	22,6	8,2	8,3	6,9	7,0	7,6
Gesamtsumme (Fzg. + NEFZ)	Ct./km	7,7	7,6	7,5	8,4	7,6	7,6	7,1	7,2	6,9	7,0	10,0	10,1	22,6	22,6	8,2	8,3	7,0	7,1	7,8
<b>Anteilige Verteilung der Kosten</b>																				
Antriebsstrang : Gesamt-Fzg.	%	21%	22%	22%	30%	21%	21%	22%	24%	20%	22%	46%	46%	78%	78%	34%	35%	21%	24%	21%
Treibstoff : Gesamtsumme	%	19%	17%	15%	17%	19%	18%	11%	11%	10%	10%	9%	9%	3%	3%	9%	9%	10%	10%	20%
<b>Vergleich relativer Mehr- (positiv) und Minderkosten (negativ) zur Referenz</b>																				
Antriebsstrang	%	0%	9%	9%	62%	0%	0%	10%	19%	-3%	8%	224%	232%	1226%	1226%	97%	105%	3%	18%	3%
Gesamtfahrzeuge	%	0%	2%	2%	13%	0%	0%	2%	4%	-1%	2%	46%	48%	254%	254%	20%	22%	1%	4%	1%
Treibstoff (NEFZ)	%	0%	-15%	-24%	-4%	-5%	-5%	-48%	-48%	-52%	-52%	-38%	-38%	-57%	-57%	-49%	-49%	-52%	-54%	5%
Gesamtkosten	%	0%	-1%	-3%	10%	-1%	-1%	-8%	-6%	-11%	-9%	30%	31%	194%	194%	7%	8%	-9%	-7%	1%

<sup>1)</sup> wegen unzureichender umweltbezogener Gesamtdaten erfolgt keine Endauswertung für dieses Fahrzeug

Tab. 4-22b: Zusammenfassung der Kostendaten der Pkw

Lfd.-Nummer	20	21	22	23 <sup>1)</sup>	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
Fahrzeug-Nummer	13	14	14	15	16	16	17	17	18	18	19	19	20	20	21	21	22	22	23	
Treibstoff-Nummer	10	8	8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	4	4	9	9	7a	
Abkürzung	DI	VKM-RME-DI	VKM-DME-DI	VKM-DME-DI	VKM-Diesel	S-Hybrid-Diesel	S-Hybrid-Diesel	S-Hybrid-Diesel (opt.)	S-Hybrid-Diesel (opt.)	S-Hybrid-Diesel (opt.)	P-Hybrid-Diesel	P-Hybrid-Diesel	P-Hybrid-Diesel (opt.)	P-Hybrid-Diesel (opt.)	VKM-LNG	VKM-LNG	VKM-EtOH	VKM-EtOH	VKM-Me-thanol	
Treibstoff	RME	DME	DME	Diesel 1L Auto	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	CNG	CNG	LNG	LNG	BioEtOH	BioEtOH	MeOH	
Abgasmindeststandard	EURO 5	EURO 4D	EURO 5	EURO 4D	EURO 4D	EURO 5	EURO 4D	EURO 5	EURO 4D	EURO 5	EURO 5	EURO 4D	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	
<b>Zusammenfassung der Kostendaten</b>																				
Summe Antriebsstrang	€	1820	1602	1835	746	4781	5015	3565	3799	2917	3151	2510	2744	2377	2549	2317	2489	1498	1670	1531
Fahrzeug ohne Antrieb	€	5906	5906	5906	2953	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906
Gesamtfahrzeug	€	7726	7508	7741	3699	10687	10921	9471	9705	8823	9057	8416	8650	8283	8455	8223	8395	7404	7576	7437
Treibstoff (Durchschnitt, Ø)	Ct./km	1,3	0,7	0,7	0,2	0,7	0,7	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,9	0,9	2,5	2,5	3,0	3,0	1,3
Treibstoff (NEFZ)	Ct./km	1,5	0,8	0,7	0,2	0,9	0,8	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,9	0,9	2,7	2,7	3,1	3,1	1,3
Gesamtsumme (Fzg. + Ø)	Ct./km	7,7	7,0	7,2	3,3	9,6	9,8	8,4	8,6	7,9	8,1	7,6	7,8	7,8	7,9	9,4	9,5	9,2	9,3	7,5
Gesamtsumme (Fzg. + NEFZ)	Ct./km	7,9	7,0	7,2	3,3	9,8	9,9	8,5	8,7	8,0	8,2	7,6	7,8	7,8	8,0	9,6	9,7	9,3	9,4	7,5
<b>Anteilige Verteilung der Kosten</b>																				
Antriebsstrang : Gesamt-Fzg.	%	24%	21%	24%	20%	45%	46%	38%	39%	33%	35%	30%	32%	29%	30%	28%	30%	20%	22%	21%
Treibstoff : Gesamtsumme	%	19%	11%	10%	7%	9%	8%	7%	7%	9%	8%	8%	7%	12%	12%	28%	28%	33%	33%	17%
<b>Vergleich relativer Mehr- (positiv) und Minderkosten (negativ) zur Referenz</b>																				
Antriebsstrang	%	18%	4%	19%	-52%	210%	226%	131%	147%	89%	105%	63%	78%	54%	65%	50%	62%	-3%	8%	-1%
Gesamtfahrzeuge	%	4%	1%	4%	-50%	44%	47%	27%	30%	18%	22%	13%	16%	11%	14%	10%	13%	-1%	2%	0%
Treibstoff (NEFZ)	%	0%	-48%	-50%	-85%	-41%	-44%	-57%	-59%	-54%	-56%	-60%	-62%	-38%	-38%	84%	84%	109%	109%	-12%
Gesamtkosten	%	3%	-9%	-7%	-57%	27%	29%	11%	13%	5%	7%	-1%	1%	2%	4%	25%	26%	20%	22%	-2%

<sup>1)</sup> wegen unzureichender umweltbezogener Gesamtdaten erfolgt keine Endauswertung für dieses Fahrzeug

Tab. 4-22c: Zusammenfassung der Kostendaten der Pkw

Lfd.-Nummer	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
Fahrzeug-Nummer	23	23	23	24	24	25	25	26	26	27	27	28	28	29	29	30	30	31
Treibstoff-Nummer	7a	7b	7b	7a	7b	7a	7b	7a	7b	5a	5b	6a	6b	5a	5b	6a	6b	11
Abkürzung	Methanol	VKM-Methanol	VKM-Methanol	S-Hybrid-Methanol-BZ	S-Hybrid-Methanol-BZ	BZ-Methanol	BZ-Methanol	DMBZ-Methanol	DMBZ-Methanol	VKM-CGH2	VKM-CGH2	VKM-LH2	VKM-LH2	BZ-CGH2	BZ-CGH2	BZ-LH2	BZ-LH2	ESF
Treibstoff	MeOH	BioMeOH	BioMeOH	MeOH	BioMeOH	MeOH	BioMeOH	MeOH	BioMeOH	CGH2-ZENT	CGH2-DE-Z	LH2-FOSSIL	LH2-REG	CGH2-ZENT	CGH2-DE-Z	LH2-FOSSIL	LH2-REG	Strommix
Abgasmindeststandard	SULEV	EURO 4B	SULEV	SULEV	SULEV	SULEV	SULEV	SULEV	SULEV	SULEV+NOx	SULEV+NOx	SULEV+NOx	SULEV+NOx	ZEV	ZEV	ZEV	ZEV	ZEV
<b>Zusammenfassung der Kostendaten</b>																		
Summe Antriebsstrang	€	1703	1531	1703	5466	5466	2749	2749	2978	2978	3539	3539	2461	2461	3586	3586	2957	8297
Fahrzeug ohne Antrieb	€	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906	5906
Gesamtfahrzeug	€	7609	7437	7609	11372	11372	8655	8655	8884	8884	9445	9445	8367	8367	9492	9492	8863	14203
Treibstoff (Durchschnitt, Ø)	Ct./km	1,3	2,9	2,9	0,8	1,9	1,0	2,4	1,1	2,7	2,2	2,9	2,6	4,7	1,3	1,8	2,9	2,1
Treibstoff (NEFZ)	Ct./km	1,3	3,0	3,0	0,9	2,0	1,1	2,5	1,2	2,8	2,3	3,1	2,7	4,9	1,3	1,8	2,9	2,2
Gesamtsumme (Fzg. + Ø)	Ct./km	7,6	9,1	9,3	10,3	11,4	8,3	9,6	8,6	10,1	10,1	10,8	9,6	11,7	9,3	9,7	10,3	14,0
Gesamtsumme (Fzg. + NEFZ)	Ct./km	7,6	9,2	9,4	10,4	11,5	8,3	9,7	8,6	10,2	10,2	10,9	9,7	11,9	9,3	9,7	10,3	14,0
<b>Anteilige Verteilung der Kosten</b>																		
Antriebsstrang : Gesamt-Fzg.	%	22%	21%	22%	48%	48%	32%	32%	34%	34%	37%	37%	29%	29%	38%	38%	33%	58%
Treibstoff : Gesamtsumme	%	17%	33%	32%	8%	18%	13%	26%	14%	27%	23%	28%	28%	41%	15%	19%	28%	15%
<b>Vergleich relativer Mehr- und Minderkosten zur Referenz</b>																		
Antriebsstrang	%	11%	-1%	11%	255%	255%	78%	78%	93%	93%	130%	130%	60%	60%	133%	133%	92%	439%
Gesamtfahrzeuge	%	2%	0%	2%	53%	53%	16%	16%	19%	19%	27%	27%	12%	12%	27%	27%	19%	91%
Treibstoff (NEFZ)	%	-12%	104%	104%	-41%	38%	-28%	67%	-19%	88%	56%	108%	85%	233%	-9%	21%	9%	45%
Gesamtkosten	%	-1%	20%	22%	35%	50%	8%	26%	12%	32%	32%	42%	26%	55%	20%	26%	34%	82%

## 4.5 Modellergebnisse des Kosten-Nutzen-Vergleiches

Aus den umweltbezogenen Differenzergebnissen zum Referenzantrieb in den Wirkungskategorien (Kapitel 4.3.5) und aus den kostenbezogenen Differenzergebnissen der Fahrzeugantriebe und deren Betrieb (Kapitel 4.4.3) werden nun im Modell die Verhältnisse für den Kosten-Nutzen-Vergleich ermittelt. Das prinzipielle Vorgehen hinsichtlich der Zusammenfassung der Daten der Wirkungsbilanzen und der Kostenbilanzen ist in der folgenden Abb. 4-23 schematisch zusammengefasst.

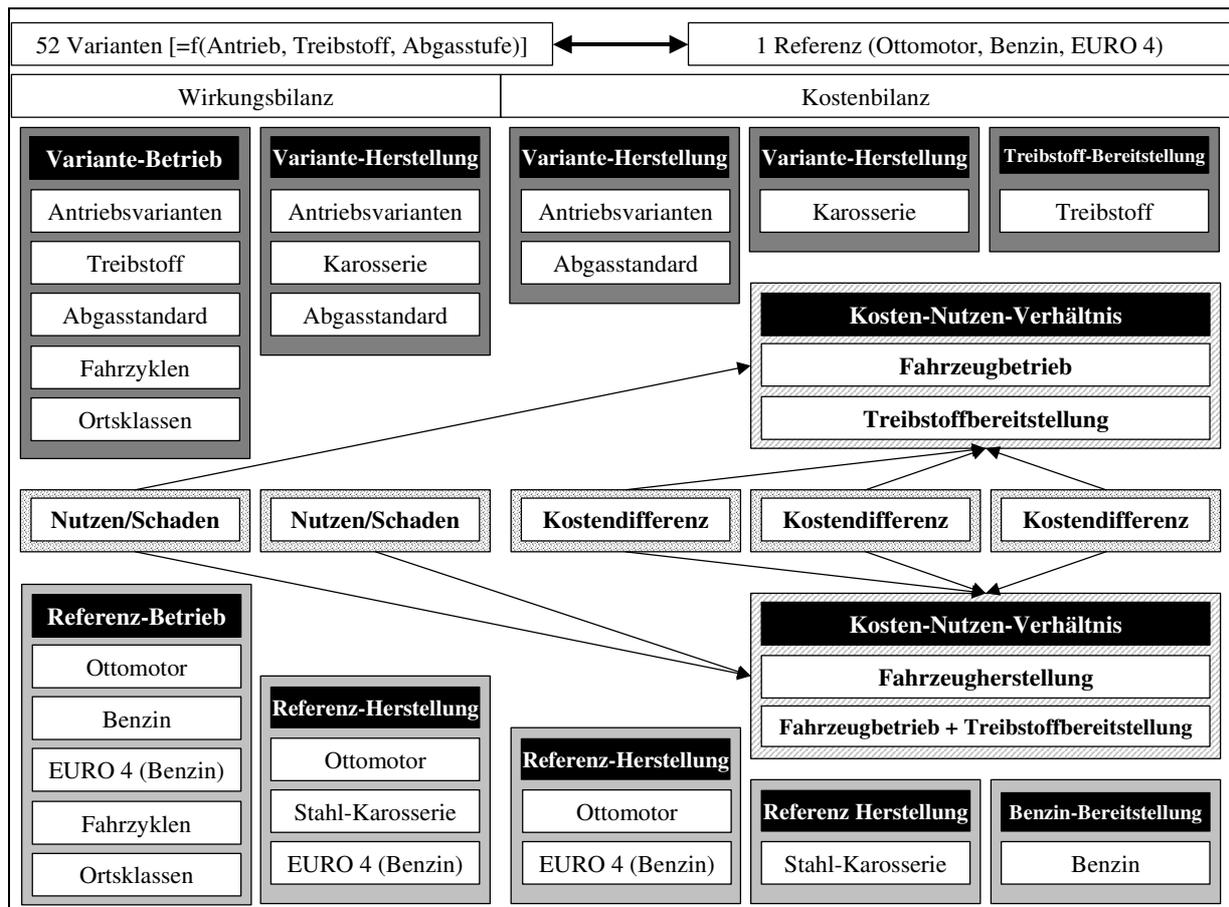


Abb. 4-23: Zusammenfassung der Daten der Wirkungs- und Kostenbilanzdaten zu einem Kosten-Nutzen-Verhältnis

In der Kosten-Nutzen-Bilanz unberücksichtigt bleiben die Ergebnisse in den folgenden Wirkungskategorien.

- (1) Direkte Humantoxizität
- (2) Kanzerogenität
- (3) Flächenverbrauch
- (4) Lärm

Die Wirkungskategorien (1), (2) können nicht berücksichtigt werden, da diese nur eine relative Toxizität und eine relative kanzerogene Potenz anzeigen. Die Ermittlung absoluter Emissions-

minderungen aus den relativen Werten ist für einen Kosten-Nutzen-Vergleich somit nicht möglich. Die Wirkungskategorie (3) ist bei allen Konzepten identisch. Damit fallen keine Mehr- oder Minderkosten für die Beeinflussung des Flächenverbrauches der Pkw an. Gleiches gilt für die Wirkungskategorie (4) insofern, als dass lärmspezifische Mehr- und Minderkosten nicht gesondert ausgewiesen werden. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass das Abrollgeräusch in der Regel das Antriebsgeräusch der neuen Antriebsvarianten dominiert. Somit existiert kein oder nur ein geringer Zusammenhang zwischen den ermittelten Kostendifferenzen, dem identischen Flächenverbrauch und den nicht explizit erhobenen Lärminderungskosten.

Grundsätzlich können die Fahrzeugkonzepte in Fahrzeuge mit Umweltnutzen und mit Umweltschaden gegenüber der Referenz, sowie in Fahrzeuge mit höheren Kosten und mit niedrigeren Kosten im Vergleich zur Referenz unterschieden werden (Abb. 3-2). In den Tab. 4-23a bis Tab. 4-23c sind wesentliche Ergebnisse zusammengefasst. In Klammern werden die laufenden Nummern der Konzepte angegeben.

- Bei kurzfristigen Verbesserungen auf der Basis des Referenzfahrzeuges mit doppeltem Nutzen<sup>5</sup> handelt es sich um Leichtlaufreifen (Lfd.-Nr. 5), Leichtlauföle (Lfd.-Nr. 6), elektromechanische Ventiltriebe (Lfd.-Nr. 3), als ein Ausführungsbeispiel einer variablen Ventilsteuerung, und – mit Ausnahme des stratosphärischen Ozonabbaues – Benzin-DI-Motoren der ersten Generation (Lfd.-Nr. 2).
- Unter den kurzfristigen Maßnahmen sind die Möglichkeiten eines milden Hybridkonzeptes auf Basis des Referenz-Pkw (Start/Stopp) (Lfd.-Nr. 4), ähnlich eines Konzeptes des Honda *Insight*, sehr genau zu prüfen. Die Systemkosten mit einem 8,8 kW Starter/Generator sind im Vergleich zur moderaten Verbrauchsminderung sehr hoch. Dass weitere Optimierungen möglich sein sollten, zeigen die Ergebnisse der optimierten Parallelhybridantriebe (Lfd.-Nr. 30-31).
- Bei zukünftigen Antrieben auf der Basis von Leichtbauvarianten mit doppeltem Nutzen finden sich kleinvolumige Benzin-DI-Motoren der Grenzwertstufen EURO 4 (Lfd.-Nr. 7, 9) und SULEV (Lfd.-Nr. 8, 10), Dieselmotoren der Grenzwertstufe EURO 5 (Lfd.-Nr. 18), sowie EURO 4- und SULEV-Konzepte unter Verwendung von Dimethylether (Lfd.-Nr. 21-22) oder Methanol aus Erdgas (Lfd.-Nr. 38-39). Kritisch sind jedoch die negativen Umweltbilanzen gegenüber der Referenz in den Wirkungskategorien stratosphärischer Ozonabbau (teilweise Benzin-DI, Diesel, DME), photochemische Oxidantienbildung und Eutrophierung (DME) zu bewerten.
- Der optimierte Diesel-Parallelhybridantrieb (Lfd.-Nr. 30-31) zeigt nur geringe Vorteile bei der Reduktion des Energieressourcenverbrauchs und größere Vorteile bei Klimagasen. Allein hinsichtlich Verbrauch, Klimagasen und Versauerung kann das Hybridkonzept als EURO 4-Variante sogar kosteneffizient sein. EURO 5-Konzepte reduzieren die Emissionen

---

<sup>5</sup> Zu den verwendeten Begriffen bei der Bewertung der Vermeidungskosten wird auf Abb. 3-2 verwiesen.

zusätzlich bei der photochemischen Oxidantienbildung (RME, Parallelhybridantrieb) und der Eutrophierung (Parallelhybridantrieb) unter das Niveau der Referenz.

- Niedrige Mehrkosten verursachen CNG (Lfd.-Nr. 32-33) und LNG-Antriebe (Lfd.-Nr. 34-35). Hinsichtlich der flächendeckenden Verfügbarkeit von Flüssigerdgas aus Übersee sind jedoch weitere wesentliche Fragen zur Infrastruktur zu klären.
- Brennstoffzellenantriebe (Lfd.-Nr. 42-47, 52-55) mindern in allen Kategorien Emissionen, sofern kein Biomethanol verwendet wird und sofern die Umweltbilanz zur Herstellung der Brennstoffzelle unberücksichtigt bleiben würde. Die Minderungskosten der methanolbetriebenen Brennstoffzellenvarianten (Lfd.-Nr. 44-47) liegen rund 30-50% unter den Werten der wasserstoffbetriebenen Varianten (Lfd.-Nr. 52-55), sofern nur Direktantriebe verglichen werden. Eine Brennstoffzellenhybridvariante (Lfd.-Nr. 42-43) liegt in den Minderungskosten auf dem Niveau der Wasserstoffvarianten. Da durch die fortschreitende Minderung der Emissionen zum Zeitpunkt der Einführung dieser Fahrzeugkonzepte der Schwerpunkt der notwendigen Minderung nicht mehr auf den limitierten Abgasemissionen, sondern auf den Treibhausgasemissionen und den Energieressourcen liegen wird, werden die Vermeidungskosten für Klimagas von Interesse sein. Für methanolbetriebene Fahrzeuge mit Direktantrieb ergeben sich Vermeidungskosten von 90 bis 180 € je Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent und für wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Pkw von 170 bis 250 € je Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent.
- Elektrofahrzeuge (Lfd.-Nr. 56) erreichen in allen Wirkungskategorien Minderungen gegenüber der Referenz zu den im Vergleich zu allen anderen Antrieben nahezu höchsten Vermeidungskosten. Ähnliche Verhältnisse werden von Wasserstoffverbrennungsmotoren unter Verwendung von Flüssigwasserstoff aus erneuerbaren Primärenergiequellen (Lfd.-Nr. 51) oder von Druckwasserstoff (Lfd.-Nr. 48-49) erreicht.
- Ungünstige Verhältnisse, verbunden mit Umweltschäden zu höheren Kosten als die Referenz, erreichen RME (Lfd.-Nr. 19-20) und Bioethanol (Lfd.-Nr. 36-37). Das ungünstigste Verhältnis ergibt sich für Wasserstoffverbrennungsmotoren (Lfd.-Nr. 50), sofern nicht-erneuerbare Primärenergieträger verwendet werden.

Tab. 4-23a: Zusammenfassung der Daten des Kosten-Nutzen-Vergleiches der Pkw

Lfd.-Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 <sup>1)</sup>	14 <sup>1)</sup>	15	16	17	18	19			
Fahrzeug-Nummer	1	2	3	4	5	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13			
Treibstoff-Nummer	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	10			
Abkürzung	Ref. VKM-Otto	Ref. VKM-Otto DI	Ref. VKM-EMVT	Ref. VKM-Start/Stopp	Ref. VKM-LLReifen	Ref. VKM-LLÖl	Ref. VKM-zin-DI	VKM-Ben-zin-DI	VKM-Ben-zin-DI	Hubredl-ader	VKM-Benz	Hubredl-ader	VKM-Benz	S-Hybrid-Benzin-DI	S-Hybrid-Benzin-DI	S-Hybrid-Be-Stirling	S-Hybrid-Be-Stirling	P-Hybrid-Benzin-DI	P-Hybrid-Benzin-DI	VKM-Diesel	VKM-Diesel	VKM-RME-DI
Treibstoff	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Diesel	Diesel	RME		
Abgasmindeststandard	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4D	EURO 5	EURO 4D			
<b>Vermeidungskosten (Umweltbilanz unter Berücksichtigung von: Fahrzeugherstellung, Antrieb, Betrieb, Treibstoff)</b>																						
Energieressourcenverbrauch	€/GJ	0	-3	-4	79	-7	-7	-6	-5	-8	-7	37	38	k.A.	k.A.	6	7	-7	-5	1		
Treibhauseffekt	€/t	0	-42	-57	1.190	-90	-90	-84	-67	-105	-86	473	482	k.A.	k.A.	74	88	-100	-76	11		
Stratosphärischer Ozonabbau	T€/kg	0,0	ES	-10,4	DS	-16,4	-16,4	ES	ES	ES	ES	DS	DS	k.A.	k.A.	DS	DS	ES	ES	DS		
Photochemische Oxidantien	€/kg	0	-88	-210	3.261	-332	-332	-380	-118	-490	-161	3.124	741	k.A.	k.A.	374	160	ES	-269	DS		
Versauerung	€/kg	0	-6	-9	95	-15	-15	ES	ES	ES	ES	DS	DS	k.A.	k.A.	DS	DS	ES	ES	DS		
Terrestrische Eutrophierung	T€/kg	0,0	-0,4	-1,5	16,4	-2,3	-2,3	-2,1	-1,0	-5,1	-1,3	1044	6,6	k.A.	k.A.	5,1	1,3	ES	-4,3	DS		
<b>Vermeidungskosten (Umweltbilanz unter Berücksichtigung von: Betrieb, Treibstoff)</b>																						
Energieressourcenverbrauch	€/GJ	0	-3	-4	86	-7	-7	-5	-4	-7	-5	26	27	110	110	4	5	-6	-4	1		
Treibhauseffekt	€/t	0	-42	-57	1.186	-90	-90	-72	-57	-92	-75	365	374	1.503	1.503	62	74	-87	-65	10		
Stratosphärischer Ozonabbau	T€/kg	0,0	ES	-10,4	215,0	-16,4	-16,4	ES	-3,2	-16,6	-2,7	DS	17,9	k.A.	k.A.	DS	4,3	ES	ES	DS		
Photochemische Oxidantien	€/kg	0	-88	-210	4.365	-332	-332	-253	-99	-337	-136	1.325	567	k.A.	k.A.	226	130	ES	-194	DS		
Versauerung	€/kg	0	-6	-9	196	-15	-15	-12	-9	-15	-12	59	59	k.A.	k.A.	10	12	-19	-11	DS		
Terrestrische Eutrophierung	T€/kg	0,0	-0,4	-1,5	30,3	-2,3	-2,3	-1,2	-0,7	-2,3	-0,9	9,2	3,9	k.A.	k.A.	1,6	0,9	ES	-1,7	DS		

<sup>1)</sup> wegen unzureichender umweltbezogener Gesamtdaten erfolgt keine Endauswertung für dieses Fahrzeug

ES: Einfacher Schaden (höhere Umweltbelastungen und geringere Kosten im Vergleich zur Referenz), siehe Abb. 3-2

DS: Doppelter Schaden (höhere Umweltbelastungen und höhere Kosten im Vergleich zur Referenz), siehe Abb. 3-2

Tab. 4-23b: Zusammenfassung der Daten des Kosten-Nutzen-Vergleiches der Pkw

Lfd.-Nummer	20	21	22	23 <sup>1)</sup>	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
Fahrzeug-Nummer	13	14	14	15	16	16	17	17	18	18	19	19	20	20	21	21	22	22	23	
Treibstoff-Nummer	10	8	8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	4	4	9	9	7a	
Abkürzung	DI	VKM-RME-DI	VKM-DME-DI	VKM-DME-DI	VKM-Diesel	S-Hybrid-Diesel	S-Hybrid-Diesel	(opt.) Diesel	S-Hybrid-Diesel	(opt.) Diesel	S-Hybrid-Diesel	P-Hybrid-Diesel	P-Hybrid-Diesel	VKM-CNG	VKM-CNG	VKM-LNG	VKM-LNG	VKM-EtOH	VKM-EtOH	VKM-Me-thanol
Treibstoff	RME	DME	DME	Diesel 1L Auto	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	CNG	CNG	LNG	LNG	BioEtOH	BioEtOH	MeOH	
Abgasmindeststandard	EURO 5	EURO 4D	EURO 5	EURO 4D	EURO 4D	EURO 5	EURO 4D	EURO 5	EURO 4D	EURO 5	EURO 4D	EURO 5	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	SULEV	EURO 4B	
<b>Vermeidungskosten (Umweltbilanz unter Berücksichtigung von: Fahrzeugherstellung, Antrieb, Betrieb, Treibstoff)</b>																				
Energieressourcenverbrauch	€/GJ	1	-14	-9	k.A.	29	29	8	9	3	5	-1	1	2	4	23	24	7	8	-5
Treibhauseffekt	€/t	23	-105	-76	k.A.	405	407	105	122	47	67	-9	10	18	37	242	255	113	123	-33
Stratosphärischer Ozonabbau	T€/kg	DS	ES	ES	k.A.	DS	DS	DS	DS	DS	DS	ES	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	ES
Photochemische Oxidantien	€/kg	2903	ES	-245	k.A.	DS	1.373	DS	482	DS	254	ES	40	37	59	468	406	DS	DS	-85
Versauerung	€/kg	DS	ES	ES	k.A.	DS	DS	DS	DS	DS	DS	ES	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	ES
Terrestrische Eutrophierung	T€/kg	DS	ES	-1,8	k.A.	DS	139,5	DS	7,8	DS	4,8	ES	0,6	1,2	0,6	15,9	4,2	DS	DS	ES
<b>Vermeidungskosten (Umweltbilanz unter Berücksichtigung von: Betrieb, Treibstoff)</b>																				
Energieressourcenverbrauch	€/GJ	1	-10	-7	-22	22	22	6	7	3	4	-1	1	1	3	18	20	7	7	-3
Treibhauseffekt	€/t	21	-89	-65	-309	321	323	91	106	40	57	-8	9	16	32	211	223	104	113	-27
Stratosphärischer Ozonabbau	T€/kg	DS	ES	ES	ES	DS	DS	DS	DS	DS	DS	ES	DS	2,2	1,1	31,8	7,8	DS	DS	-3,0
Photochemische Oxidantien	€/kg	258	-1.002	-175	ES	DS	835	DS	331	DS	172	ES	28	31	51	394	352	DS	DS	-63
Versauerung	€/kg	15	-11	-8	-59	79	53	20	17	9	9	-2	1	DS	DS	DS	DS	DS	DS	-4
Terrestrische Eutrophierung	T€/kg	DS	ES	-1,0	ES	DS	7,9	DS	2,7	DS	1,4	ES	0,2	0,4	0,4	6,1	3,0	DS	DS	-3,5

<sup>1)</sup> wegen unzureichender umweltbezogener Gesamtdaten erfolgt keine Endauswertung für dieses Fahrzeug

ES: Einfacher Schaden (höhere Umweltbelastungen und geringere Kosten im Vergleich zur Referenz), siehe Abb. 3-2

DS: Doppelter Schaden (höhere Umweltbelastungen und höhere Kosten im Vergleich zur Referenz), siehe Abb. 3-2

Tab. 4-23c: Zusammenfassung der Daten des Kosten-Nutzen-Vergleiches der Pkw

Lfd.-Nummer	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	
Fahrzeug-Nummer	23	23	23	24	24	25	25	26	26	27	27	28	28	29	29	30	30	31	
Treibstoff-Nummer	7a	7b	7b	7a	7b	7a	7b	7a	7b	5a	5b	6a	6b	5a	5b	6a	6b	11	
Abkürzung	VKM-Methanol	VKM-Methanol	VKM-Methanol	S-Hybrid-Methanol-BZ	S-Hybrid-Methanol-BZ	BZ-Methanol	BZ-Methanol	DMBZ-Methanol	DMBZ-Methanol	VKM-CGH2	VKM-CGH2	VKM-LH2	VKM-LH2	BZ-CGH2	BZ-CGH2	BZ-LH2	BZ-LH2	ESF	
Treibstoff	MeOH	BioMeOH	BioMeOH	MeOH	BioMeOH	MeOH	BioMeOH	MeOH	BioMeOH	CGH2-ZENT	CGH2-DE-Z	LH2-FOSSIL	LH2-REG	CGH2-ZENT	CGH2-DE-Z	LH2-FOSSIL	LH2-REG	Strommix	
Abgasmindeststandard	SULEV	EURO 4B	SULEV	SULEV	SULEV	SULEV	SULEV	SULEV	SULEV	SULEV+NOx	SULEV+NOx	SULEV+NOx	SULEV+NOx	ZEV	ZEV	ZEV	ZEV	ZEV	
<b>Vermeidungskosten (Umweltbilanz unter Berücksichtigung von: Fahrzeugherstellung, Antrieb, Betrieb, Treibstoff)</b>																			
Energieressourcenverbrauch	€/GJ	-1	8	9	44	23	12	11	25	14	64	225	DS	DS	17	26	52	39	126
Treibhauseffekt	€/t	-6	107	117	371	295	91	147	162	184	448	803	DS	267	176	251	265	174	1.001
Stratosphärischer Ozonabbau	T€/kg	-0,2	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS
Photochemische Oxidantien	€/kg	-10	DS	DS	693	DS	152	DS	247	DS	2.187	8.502	DS	993	321	443	333	401	1.172
Versauerung	€/kg	-1	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS
Terrestrische Eutrophierung	T€/kg	-0,1	DS	DS	5,6	DS	1,1	DS	1,7	DS	DS	DS	DS	DS	2,4	3,1	7,0	2,5	31,0
<b>Vermeidungskosten (Umweltbilanz unter Berücksichtigung von: Betrieb, Treibstoff)</b>																			
Energieressourcenverbrauch	€/GJ	-1	7	8	23	17	7	9	12	11	42	95	DS	300	12	17	20	25	84
Treibhauseffekt	€/t	-6	99	108	260	238	68	127	118	159	370	624	DS	249	142	198	184	152	819
Stratosphärischer Ozonabbau	T€/kg	-0,2	DS	DS	7,2	21,9	1,6	15,7	2,5	26,0	9,2	14,3	45,8	15,2	4,1	5,7	5,3	6,7	108,3
Photochemische Oxidantien	€/kg	-10	DS	DS	480	DS	116	DS	188	DS	1.312	2.853	4.319	843	260	354	258	340	987
Versauerung	€/kg	-1	74	74	39	74	10	50	17	79	27	36	24	43	15	20	13	24	66
Terrestrische Eutrophierung	T€/kg	-0,1	DS	DS	2,5	DS	0,6	DS	1,0	DS	DS	DS	DS	DS	1,5	2,0	2,4	1,9	15,3

ES: Einfacher Schaden (höhere Umweltbelastungen und geringere Kosten im Vergleich zur Referenz), siehe Abb. 3-2,

DS: Doppelter Schaden (höhere Umweltbelastungen und höhere Kosten im Vergleich zur Referenz), siehe Abb. 3-2

## 4.6 Bewertungsverfahren für die Modellergebnisse

Nachdem die im Modell berechneten Ergebnisse zunächst sehr differenzierte Aussagen zu den Antriebsvarianten und Wirkungskategorien zulassen, sollen nun die Ergebnisse hinsichtlich einer erweiterten Bewertung und Einordnung in einen Gesamtzusammenhang gestellt werden. Diesbezüglich müssen zunächst prinzipielle Einschränkungen dargestellt werden, um daraus sinnvolle Bewertungsverfahren abzuleiten.

### Einschränkungen hinsichtlich Humantoxizität und Kanzerogenität

Für die wesentlichen ökologischen Wirkungskategorien können Ergebnisse eines Kosten-Nutzen-Vergleiches vorgelegt werden. Eine Ausnahme bilden die Wirkungskategorien Humantoxizität und Kanzerogenität. Da es sich ausschließlich um relative Ergebnisse handelt, kann kein Kosten-Nutzen-Verhältnis ermittelt werden. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis kann deshalb nicht alle wichtigen ökologischen Aspekte abdecken.

### Auswerteverfahren

Während hinsichtlich der ökologischen Wirkungskategorien die Möglichkeit bestand, alle Einzelergebnisse einem relativen Bewertungsverfahren zu unterziehen und die prozentualen Minder- oder Mehrmissionen (-100%...>100%) gegenüber dem Referenz-Pkw nach ihrer Priorität in einer Punkteskala (-10...+10) für verschiedene Szenarien zusammenzufassen (Abb. 4-21a bis Abb. 4-21b), besteht diese Möglichkeit für die Kosten-Nutzen-Ergebnisse nicht. Es ist unzulässig, Vermeidungskosten unterschiedlicher Wirkungskategorien auf Grundlage der Absolutergebnisse rechnerisch zu verknüpfen. Insofern ist eine auf die jeweilig untersuchte Wirkungskategorie bezogene Diskussion der Einzelergebnisse notwendig (siehe auch Kapitel 4.5). Es erweist sich für die Auswertungen als hilfreich, zur Ermittlung eines singulären Endergebnisses alle 53 Antriebsvarianten, die anhand der umfassenden Modellierung ausgewertet werden, in den einzelnen Kategorien einer Rangfolge (1-53) zu unterziehen. Ausgenommen werden die Konzepte, für die keine kompletten Datensätze zur Verfügung stehen (z.B. Stirling, Lfd.-Nr. 13/14; 1-Liter-Auto, Lfd.-Nr. 23).

Die **umweltbezogene Rangbildung** erfolgt anhand der bekannten Gewichtung der Umweltaspekte, indem das Punktesystem (Abb. 4-21a, Abb. 4-21b) auf Grundlage der Gewichtung im CO<sub>2</sub>- und im Humantoxizitätsszenario (Tab. 4-17) ausgewertet wird. Auf das 1:1-Szenario wird an dieser Stelle verzichtet, da aus dem arithmetische Mittel der beiden Schwerpunktszenarien keine weiteren Aussagen abgeleitet werden können. Die **Rangbildung für das Kosten-Nutzen-Verhältnis** erfolgt anhand einer Rangbildung in allen einzelnen untersuchten Wirkungskategorien nach Tab. 4-23a bis Tab. 4-23c und einer Gewichtung der Ergebnisse im bereits verwendeten CO<sub>2</sub>-Szenario (Kapitel 4.3.7). Da für die Wirkungskategorien Humantoxizität und Kanzerogenität keine Kosten-Nutzen-Ergebnisse ermittelt werden können, werden die Gewichtungsanteile von 15% im CO<sub>2</sub>-Szenario (5% direkte Humantoxizität; 10% Kanzerogenität) im Verhältnis auf die weiteren Wirkungskategorien übertragen (Tab. 4-24). Sofern bei den Konzep-

ten in einer Wirkungskategorie ein Schaden<sup>6</sup> in Form höherer Umweltwirkungen als bei der Referenz auftritt, also keine Vermeidungskosten errechnet werden können, wird dem Konzept in der maßgeblichen Kategorie automatisch der letzte Rang zugeordnet. Die Kosten-Nutzen-Daten werden einerseits unter Berücksichtigung der Umweltbilanz der Fahrzeug-, der Antriebs- und der Treibstoffherstellung, sowie des Fahrzeugbetriebes ausgewertet und andererseits allein unter Berücksichtigung des Fahrzeugbetriebes und der Treibstoffherstellung untersucht.

Tab. 4-24: Zusammenfassung der Gewichtungsszenarien für verschiedene Wirkungskategorien

Wirkungskategorie	Gewichtung nach Nutzen <sup>1)</sup>		Gewichtung nach Kosten-Nutzen	
	CO <sub>2</sub>	Humantoxizität	CO <sub>2</sub>	Humantoxizität <sup>2)</sup>
1. Ressourcenbeanspruchung	10%	10%	13%	k.A.
2. Treibhauseffekt	45%	15%	60%	k.A.
3. Stratosphärischer Ozonabbau	5%	5%	7%	k.A.
4. Direkte Humantoxizität	5%	15%	0% <sup>2)</sup>	k.A.
4.1. Kanzerogenität	10%	30%	0% <sup>2)</sup>	k.A.
5. Direkte Ökotoxizität	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
6. Photochemische Oxidantienbildung	5%	5%	7%	k.A.
7. Versauerung	5%	5%	7%	k.A.
8. Eutrophierung	-	-	-	-
8.1. Aquatische Eutrophierung	-	-	-	-
8.2. Terrestrische Eutrophierung	5%	5%	7%	k.A.
9. Naturraumbeanspruchung (Flächen)	-	-	-	-
10. Lärm	10%	10%	0% <sup>3)</sup>	k.A.

<sup>1)</sup> Gewichtungsszenarien für umweltbezogene Wirkungskategorien, wie [Tab. 4-17](#).

<sup>2)</sup> Keine Gewichtung, da das Kosten-Nutzen Verhältnis für die Kategorien/Schwerpunkte nicht zu ermitteln ist. Die Gewichtungen aus dem CO<sub>2</sub>-Nutzen-Szenario werden auf die verbleibenden Kategorien aufgeteilt.

<sup>3)</sup> Lärmspezifische Minderungskosten werden im Modell nicht erhoben.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Rangfolgen findet sich in [Tab. 4-25](#). Diese Ergebnisse können nicht weiter miteinander verknüpft werden (z.B. arithmetische Mittelung), da in jedem Szenario vollkommen unterschiedliche Randbedingungen gelten. Anders als das bekannte Punktesystem sind die folgenden Ergebnisse nicht von der Referenz, sondern von den Eigenschaften aller 53 konkurrierenden Systeme abhängig.

Alle Maßnahmen, die zu einer Minderung der Umweltbelastung bei niedrigeren Kosten im Vergleich zum Referenz-Pkw führen („Vermeidungskosten < 0“) sind bevorzugt einzusetzen ([Tab. 4-25](#), gestrichelter Pfeil nach oben). In dieser Gruppe sind jene Maßnahmen besonders attraktiv, die den besten Rang in der Umweltbewertung aufweisen (Pfeil nach oben). Alle anderen Maßnahmen mit „Vermeidungskosten > 0“ sind nach ihrer Rangfolge dargestellt (Pfeil nach unten). Folgende grundlegenden Ergebnisse können abgeleitet werden:

<sup>6</sup> Zu den verwendeten Begriffen bei der Bewertung der Vermeidungskosten wird auf [Abb. 3-2](#) verwiesen.

Tab. 4-25: Rangfolge der Umwelteigenschaften und der Kosten-Nutzen-Verhältnisse der Pkw verschiedener Antriebsvarianten

Fahrzeugkonzept und deren Rangfolge Lfd.-Nr. in eckigen Klammern	Umweltrang nach Schwerpunktszenario		Kosten-Nutzen-Rang nach Umweltbilanz mit		Kostenrang
	CO <sub>2</sub>	Human-toxizität	Herstellung, Betrieb, Treibstoff	Betrieb, Treibstoff	Fahrzeug, Kraftstoff
[10] VKM-Benzin-Hubred.-Lader SULEV	11	11	5	4	3
[8] VKM-Benzin-DI SULEV	20	28	12	5	8
[39] VKM-Methanol SULEV	21	13	14	12	15
[22] VKM-DME-DI EU5	25	21	7	10	7
[38] VKM-Methanol EURO 4B	30	23	15	11	10
[18] VKM-Diesel EU5	31	35	10	9	6
[9] VKM-Benzin-Hubred.-Lader EURO 4B	33	38	3	1	1
[21] VKM-DME-DI EURO 4D	34	26	11	8	4
[3] Ref. VKM EMVT EURO 4B	38	39	4	6	9
[7] VKM-Benzin-DI EURO 4B	40	45 <sup>1)</sup>	6	7	5
[5] Ref. VKM-Otto-LLReifen EURO 4B	44	40	1	2	13
[6] Ref. VKM-Otto-LLÖl EURO 4B	46	41	2	3	14
[17] VKM-Diesel EURO 4D	49	52 <sup>1)</sup>	13	13	2
[2] Ref. VKM-Otto DI EURO 4B	51 <sup>1)</sup>	47 <sup>1)</sup>	9	14	11
<b>[1] Ref. VKM-Otto EURO 4B</b>	<b>50</b>	<b>43</b>	<b>8</b>	<b>15</b>	<b>16</b>
[31] P-Hybrid (opt.)-Diesel EU5	24	32	16	16	17
[32] CNG EURO 4B	26	22	17	17	19
[33] CNG SULEV	17	12	18	18	21
[30] P-Hybrid (opt.) Diesel EURO 4D	43	48 <sup>1)</sup>	18	19	12
[44] BZ-Methanol-R SULEV	12	6	25	20	25
[16] P-Hybrid-Benzin-DI SULEV	23	29	23	21	26
[29] P-Hybrid-Diesel EU5	29	34	20	22	23
[20] VKM-RME-DI EU5	32	37	22	23	20
[15] P-Hybrid-Benzin-DI EURO 4B	39	44	24	24	24
[19] VKM-RME-DI EURO 4D	41	50	21	25	18
[28] P-Hybrid-Diesel EURO 4D	48	51	26	26	22
[46] DMBZ-Methanol SULEV	18	8	31	27	29
[27] S-Hybrid (opt.) Diesel EU5	27	33	27	28	30
[52] BZ-CGH2-zentr. ZEV	3	2	32	29	33
[26] S-Hybrid (opt.) Diesel EURO 4D	45	49	28	30	28
[40] VKM-BioMethanol EURO 4B	9	25	29	31	32
[54] BZ-LH2 ZEV	19	9	41	31	31
[55] BZ-REG-LH2 ZEV	1	1	34	31	48
[53] BZ-CGH2-dezent. ZEV	4	3	38	34	39
[36] VKM-BioEtOH EURO 4B	16	27	30	35	34
[45] BZ-BioMethanol-R SULEV	5	15	36	36	38
[41] VKM-BioMethanol SULEV	8	19	33	37	35
[37] VKM-BioEtOH SULEV	13	24	35	38	36
[35] LNG SULEV	14	10	39	39	41
[34] LNG EURO 4B	22	18	37	40	37
[47] DMBZ-BioMethanol SULEV	7	17	40	41	47
[42] S-Hybrid-Methanol-R-BZ SULEV	10	5	42	42	49
[43] S-Hybrid-BioMethanol-R-BZ SULEV	6	14	44	43	51
[51] VKM-REG-LH2 SULEV-NO <sub>x</sub>	2	4	45	44	52
[25] S-Hybrid-Diesel EU5	37	36	43	45	43
[12] S-Hybrid-Benzin-DI SULEV	35	30	46	46	45
[48] VKM-CGH2-zentr. SULEV-NO <sub>x</sub>	28	16	50	47	46
[11] S-Hybrid-Benzin-DI EURO 4B	42	46	48	48	44
[24] S-Hybrid-Diesel EURO 4D	53	53	49	49	42
[56] ESF ZEV	15	7	51	50	53
[49] VKM-CGH2-dezent. SULEV-NO <sub>x</sub>	36	20	52	51	50
[4] Ref. VKM-Otto-Start/Stopp EURO 4B	47	42	47	52	27
[50] VKM-LH2 SULEV-NO <sub>x</sub>	52	31	53	53	40

<sup>1)</sup>Umweltrang ungünstiger als für das Referenzfahrzeug

Zukünftige verbrauchsarme Benzinmotoren sind auch dann sehr kosteneffizient, sofern diese aus Umweltschutzsicht den bestehenden EURO 4 Grenzwert deutlich unterschreiten (Lfd.-Nr. 8, 10). Es folgen Pkw mit günstigen Umwelteigenschaften, verbunden mit niedrigeren Kosten als das Referenzfahrzeug, Methanol (SULEV, EURO 4B; Lfd.-Nr. 39, 38), DME (EURO 5; Lfd.-Nr. 22) und Diesel-Pkw (EURO 5; Lfd.-Nr. 18). Ein geringeres Umweltpotential bei sehr gutem Kostenverhältnis erreichen die elektromechanischen Ventiltriebe (Lfd.-Nr. 3), die Leichtlaufreifen (Lfd.-Nr. 5) und die Leichtlauföle (Lfd.-Nr. 6). Auch aufgeladene Ottomotoren der Grenzwertstufe EURO 4B (Lfd.-Nr. 9) und DME der Grenzwertstufe EURO 4D (Lfd.-Nr. 21) schneiden noch sehr gut ab.

Kosteneffizient, jedoch hinsichtlich der humantoxischen Emissionsszenarien ungünstiger als der Referenz-Pkw, schneiden Benzin-Direkteinspritzer im Abgasstandard EURO 4B (Lfd.-Nr. 7, 2) und Diesel im Abgasstandard EURO 4D (Lfd.-Nr. 17) ab.

Zu den Fahrzeugkonzepten mit niedrigen Mehrkosten in der Vermeidungskostenrechnung gehören optimierte Diesel-Parallelhybridantriebe (EURO 5, EURO 4D; Lfd.-Nr. 31, 30), Druckerdgas (EURO 4, SULEV; Lfd.-Nr. 32, 33) und Brennstoffzellen mit Methanolreformer (Lfd.-Nr. 44).

Bei den aus Kosten-Nutzen-Sicht ungünstigen Varianten handelt es sich um Direktmethanolbrennstoffzellen unter Verwendung von Biomethanol (Lfd.-Nr. 47), serielle Hybridantriebe (Lfd.-Nr. 42, 43, 25, 12, 11, 24), Elektrofahrzeuge (Lfd.-Nr. 56), aufwändig gestaltete Hybridvarianten auf der Basis heutiger Fahrzeuge (Lfd.-Nr. 4) und Wasserstoffverbrennungsmotoren mit Druck- und Flüssigwasserstoffspeicher (Lfd.-Nr. 48-51).

#### **4.7 Einfluss der Kraftstoffkosten und der Wahl der Referenz**

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell bietet die Möglichkeit, die spezifischen Eingangsdaten hinsichtlich der Kosten für Teilkomponenten zu ändern und die Ergebnisse erneut zu berechnen, um einzelne Konzepte im Vergleich zu ihrer Konkurrenz zu bewerten. In Sensitivitätsuntersuchungen sollen Festlegungen und Annahmen, die nicht in ausreichender Weise empirisch belegt oder objektiv begründbar sind, untersucht werden. Dies gilt vor allem bei Daten aus Studien, die nicht ein Einzelprodukt, sondern den betreffenden gesamten Markt betrachten oder verschiedene Eingabegrößen nicht als Einzelwerte, sondern nur als statistische Verteilungen darstellen.

##### *Einfluss der Rohöl- und weiteren Treibstoffkosten auf das Ergebnis*

Einen starken Einfluss besitzen die verwendeten Treibstoffkosten und deren Verhältnisse zueinander auf das Ergebnis. Bei einer Normierung auf einen Liter Benzinäquivalent und unter Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Emissionen könnte Flüssigerdgas (LNG) aus Übersee eine interessante Option zur CO<sub>2</sub>-Minderung bieten. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen aber auch, dass gerade die Kosten der LNG-Anwendung im Pkw z.B. hinsichtlich der Speichertechnologie nicht zu vernachlässigen sind.

Würden sich die Kosten von Benzin und Diesel erhöhen, z.B. wegen einer Steigerung des Rohölpreises, zeigt Abb. 4-24, dass auch die erdgasbasierenden Treibstoffe, Druckerdgas (CNG),

Dimethylether (DME), Methanol und ebenso Rapsölmethylester (RME) bei einer im Vergleich zur Referenz effizienteren Nutzung im Verbrennungsmotor kosteneffiziente Alternativen sein könnten. Hieraus ergibt sich die Frage, ab welchen Rohölkosten neue Treibstoffe konkurrenzfähig sind.

Um diese Frage zu beantworten, muss zunächst ein Zusammenhang zwischen den in dieser Arbeit verwendeten Benzin- und Dieselpreisen und den Rohölkosten hergestellt werden. Diese Einordnung unterliegt erheblichen Marktschwankungen (Abb. 7-28, Anhang), die nicht allein in Devisenkursschwankungen begründet sind. Die Darstellung der Zusammenhänge zwischen Rohölpreis und Kraftstoffpreisen (Abb. 7-29, Anhang) ermöglichen eine grundsätzliche Orientierung hinsichtlich der berücksichtigten Kostenstrukturen. Die in dieser Arbeit berücksichtigten Kosten der Benzin- und Dieseltreibstoffe gehen von einem Rohölpreis von etwa 23 US\$ je Fass (Barrel), sofern ein Gewinnaufschlag von 30% berücksichtigt wird, und von 29 US\$ je Barrel ohne Gewinnaufschlag aus.

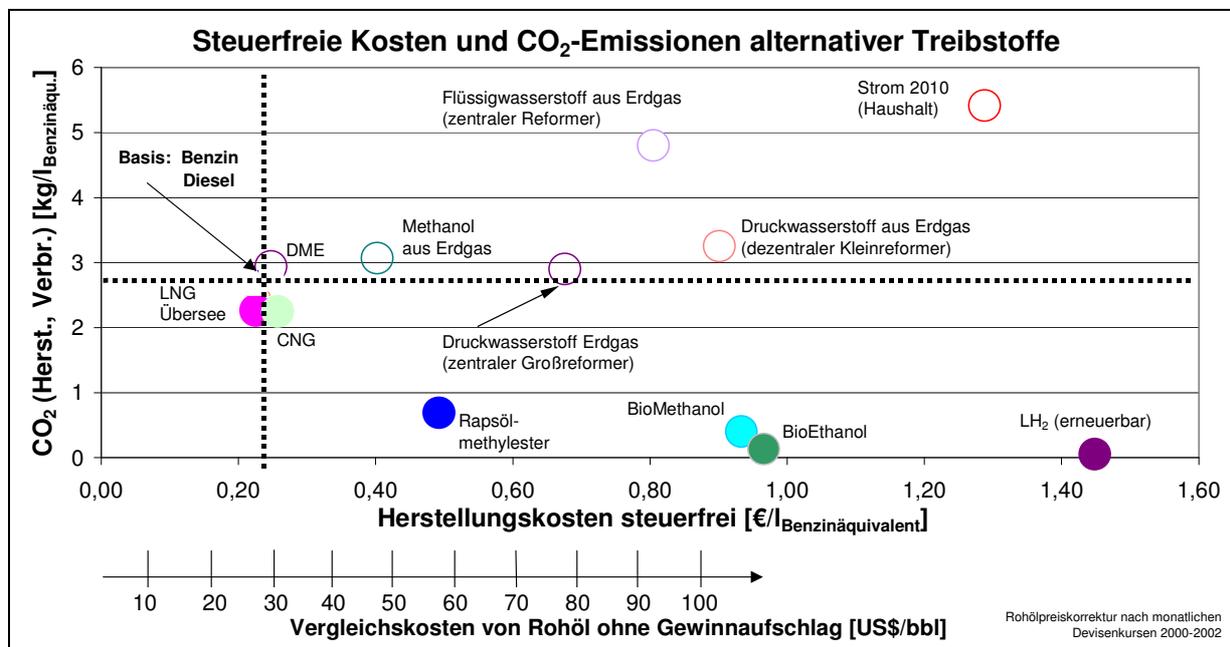


Abb. 4-24: Gegenüberstellung von Herstellungskosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen von Treibstoffen im Vergleich zu Benzin und Diesel

Die Verknüpfung der Ergebnisse führt zu den in Abb. 4-24 aufgeführten Vergleichskosten von Rohöl und zeigt, dass ohne Berücksichtigung von Gewinnaufschlägen Treibstoffe wie Methanol erst ab einem Rohölpreis um 45 US\$ je Barrel und Rapsölmethylester ab einem Rohölpreis von 60 US\$ ein vergleichbares Kostenniveau wie Benzin und Diesel erreichen können. Das heißt, erst ab diesen Grenzkosten des Rohöls kann es interessant werden, die neuen Treibstoffe am Markt zu konkurrenzfähigen Kosten anzubieten. Für DME und CNG gilt dies bereits bei Rohölkosten von 29 US\$ je Fass. Erst wenn die Rohölkosten 75 US\$ je Fass übersteigen, wird nach den vorliegenden Berechnungen Druckwasserstoff aus Erdgas konkurrenzfähig sein. Strom oder Flüssigwasserstoff aus der Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Quellen wird danach erst ab 140 bis 150 US\$ je Fass konkurrenzfähig werden.

### Einfluss der Wahl der Referenz auf das Ergebnis

Ein Schwachpunkt umweltbezogener Bewertungen ist häufig die Auswahl des Referenzfahrzeuges. Wird eine aus Umweltschutzsicht technisch anspruchslose Referenz gewählt, die nicht einmal die vereinbarten Ziele einhält (z.B. EURO 4 Abgasstandard, durchschnittlich 140 g/km ACEA-CO<sub>2</sub>-Standard), so können die Modellergebnisse die Realität nicht ausreichend abbilden. Um diesen prinzipiellen Sachverhalt darzustellen, wird hier die Referenz vom Otto-Pkw mit einem Verbrauch um 6 Liter (Fahrzeug Nr. 1) zum Benzin-Direkteinspritzer mit einem Verbrauch um 3 Liter je 100 Kilometer (Fahrzeug Nr. 7) verschoben. Während sich die absoluten Ergebnisse der Umweltbewertung durch die Wahl der neuen Referenz nicht ändern, ergeben sich relative Änderungen. Am Beispiel der CO<sub>2</sub>-Emissionen werden die neuen Ergebnisse für die Vermeidungskosten einiger Pkw-Varianten zusammengefasst (Abb. 4-25), deren laufenden Nummern in eckigen Klammern angegeben sind. Durch die Wahl eines Mindestemissionsstandards EURO 4B oder EURO 5 ist die Vergleichbarkeit der Konzepte sichergestellt.

Einzig der EURO 4 Diesel und der hoch aufgeladene Ottomotor ermöglichen noch niedrigere CO<sub>2</sub>-Emissionen bei geringeren Kosten als die Referenz (doppelter Nutzen). Bei allen anderen Varianten steigen die Vermeidungskosten überproportional an. Sobald im Vergleich zur deutlich verbrauchsgünstigeren Referenz (Fahrzeug Nr. 7) höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht werden, kippt die Beurteilung sogar zu sog. doppelten Schäden (höhere Emissionen zu höheren Kosten als die Referenz).

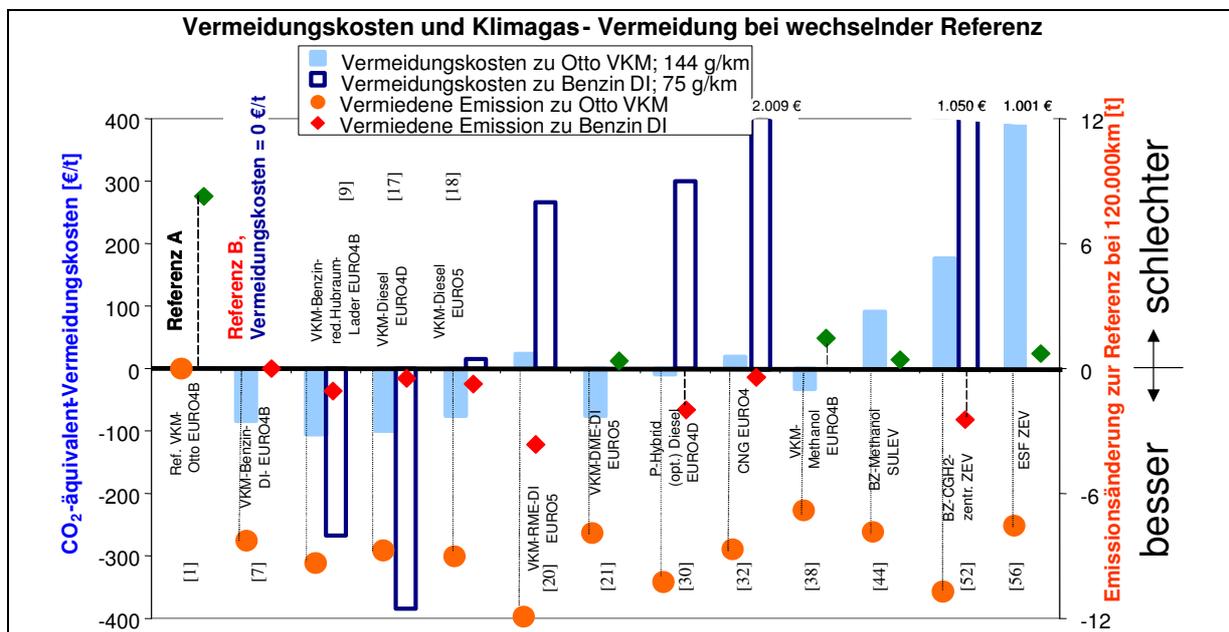


Abb. 4-25: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten bei wechselnder Referenz

Der Wechsel zu einer verbrauchsgünstigen Referenz ergibt damit für die Varianten, deren Vorteil in einem relativ einfachen Wechsel des Energieträgers lag (z.B. RME, Methanol, DME), ein deutlich realistischeres Bild. Sofern einmal verbrauchssarme Verbrennungsmotoren für Benzin und Diesel eingeführt sind, bleibt allein die effiziente Nutzung dieser fossilen Kraftstoffe die kosteneffizienteste Maßnahme der CO<sub>2</sub>-Minderung. Treibstoffe, die auf einen relativ einfachen

Wechsels der Energieträger aufbauen, könnten nur dann noch einmal interessant werden, sofern sie in Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen eindeutige Vorteile gegenüber Benzin und Diesel aufweisen. Um diese Aussagen treffen zu können, ist es daher notwendig, neben den spezifischen Vermeidungskosten auch die absoluten Emissionsminderungen zu bewerten.

#### 4.8 Weitergehende Nutzungen der Modellergebnisse

Das aus der Systematik der Ökobilanzen abgeleitete Bewertungsverfahren der direkten und indirekten Umweltwirkungen in Kombination mit einer Zuordnung nach lokalen, regionalen und globalen Ortsklassen eignet sich, um heutige und zukünftige Antriebsvarianten für den Straßenverkehr zu vergleichen.

##### Frühzeitige Identifikation der Schwächen zukünftiger Antriebe

Das Verfahren bietet die Möglichkeit, eine Schwachstellenanalyse vorzunehmen. So können eindeutige Nachteile bei der Verwendung biogener Treibstoffe (Biomethanol, Bioethanol, RME) im Vergleich zur effizienten Verwendung von Treibstoffen aus nicht-erneuerbaren Quellen (Benzin, Methanol, Diesel) hinsichtlich der Wirkungskategorien Eutrophierung (Biomethanol, Bioethanol, RME), Versauerung (Bioethanol), photochemische Oxidantienbildung (Biomethanol) und stratosphärischer Ozonabbau (RME, Bioethanol) identifiziert werden.

Problematisch kann sich zukünftig auch die Herstellung von Antrieben und Fahrzeugen erweisen,

- da der Leichtbau im Karosseriebau deutlich höhere Emissionen in der Wirkungskategorie Versauerung verursacht,
- da die Dimensionierung der Batterien und Elektroantriebe hinsichtlich des stratosphärischen Ozonabbaus in der Herstellung nicht zu vernachlässigen ist, und
- da der Brennstoffzellenantriebe durch die Bilanzen der Platingewinnung und die Herstellung der elektrischen Antriebe in den Kategorien Energieverbrauch und Treibhausgase ungünstiger bewertet werden als Fahrzeugantriebe mit Verbrennungskraftmaschinen.

Letztlich ermöglicht das Verfahren auch eine eindeutige Bewertung bestehender und zukünftiger Grenzwertanforderungen und Technologien hinsichtlich ihrer Umweltwirkung:

- Die Einführung eines EURO 5 Grenzwertes für Diesel-Pkw wird das Verhältnis der Umweltbewertung mindestens auf das Niveau eines heutigen Referenz-Pkw bringen, sofern der Schwerpunkt auf der Bewertung der Humantoxizität liegt. Es verschiebt sich deutlich zu Gunsten des Dieselantriebes, falls der Schwerpunkt auf der Minderung der Klimagase liegt.
- Benzin-Direkteinspritzer-Motoren haben ein Partikelproblem, das zwar bei weitem nicht dem der EURO 4 Dieselmotoren entspricht, jedoch mit der Stufe EURO 5 für Diesel deutlich über dem durch Partikelfilter erreichbaren Niveau liegen könnte. Hier ist in Zukunft eine motor-

seitige (weitgehend homogener Betrieb) oder abgasseitige Nachbehandlung notwendig, die aber systemspezifischen Verbrauchsvorteile des Konzeptes reduzieren kann.

- Wasserstoffverbrennungsmotoren können einen SULEV Grenzwert ohne aufwändige Abgasnachbehandlung nicht erreichen, da sie durch hohe Stickstoffoxidemissionen auffallen.
- Die Vorteile der Fahrzeugemissionen alternativer Treibstoffe (z.B. Erdgas, Methanol, Ethanol) in Verbrennungskraftmaschinen sind begrenzt. Durch die Einführung strenger Grenzwerte für Benzinfahrzeuge gleicht sich das Niveau der Abgasemissionen aller Fahrzeuge immer weiter an.

#### Modellierung von Emissionsszenarien zukünftiger Antriebe

Die im Zuge des Modells ermittelten Daten für die repräsentativen Fahrzyklen können für weitere Emissionsmodellierungen (z.B. TREMOD [123], [127]) verwendet werden und können so als Grundlage für Bewertungen von Maßnahmen dienen. Diese Anwendungsmöglichkeit wird in Kapitel 5.2, Abb. 5-4 genutzt.

#### Fahrzeugspezifische Analyse der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten zukünftiger Antriebe

Die in dieser Arbeit geschaffenen Bewertungsgrundlagen und Kostenstrukturen können nicht nur dafür verwendet werden, neue Antriebsvarianten zu vergleichen. Die Datenstruktur ermöglicht es auch, einzelne motor- und fahrzeugtechnische Maßnahmen miteinander zu vergleichen. Tab. 7-48 (Anhang) zeigt ein solches Beispiel weiterer Anwendungsmöglichkeiten des Modells. Bezogen auf eine Reduktion um ein Gramm CO<sub>2</sub> je gefahrenen Kilometer im NEFZ zeigen die möglichen Konzepte zur Verbrauchssenkung, dass CO<sub>2</sub>-Minderungen bei Benzinfahrzeugen bereits zu Herstellungskosten von 1 bis 30 €/g<sub>CO<sub>2</sub>/km möglich sind. Durch eine Kombination mit einem Wechsel des Antriebes vom Benzinantrieb auf den Dieselmotor ergeben sich Herstellungskosten für die Vermeidung von CO<sub>2</sub> in Höhe von 4 bis 40 €/g<sub>CO<sub>2</sub>/km. In der Variante der Anwendung heutiger Hybridantriebe liegen die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der Herstellung bei 15 bis 45 €/g<sub>CO<sub>2</sub>/km.</sub></sub></sub>

#### Entscheidungshilfen für Automobilhersteller und Gesellschaft

Die mit Hilfe des Modells ermittelten Ergebnisse können so aufbereitet werden, dass Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger unterschiedlicher Interessengruppen abgeleitet werden können. Am Beispiel der Ergebnisse der CO<sub>2</sub>- und Klimagasemissionen und der Kostenbilanzen der untersuchten Fahrzeuge wird dies in Abb. 4-26 und Abb. 4-27 dargestellt.

Während sich das Herstellerinteresse auf bestehende Selbstverpflichtungen und die fahrzeugeitige Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kosten beschränkt, um die kosteneffizientesten Optimierungen für Pkw-Antriebe zu identifizieren, konzentriert sich die Bewertung aus gesellschaftlicher Sicht auf eine gesamtheitliche Bewertung aller Klimagasemissionen und der Lebenszykluskosten. Für beide Interessengruppen und deren Aufgabenstellungen liefert das entwickelte Modell die entsprechenden Ergebnisse, um optimale Antriebsvarianten zu identifizieren.

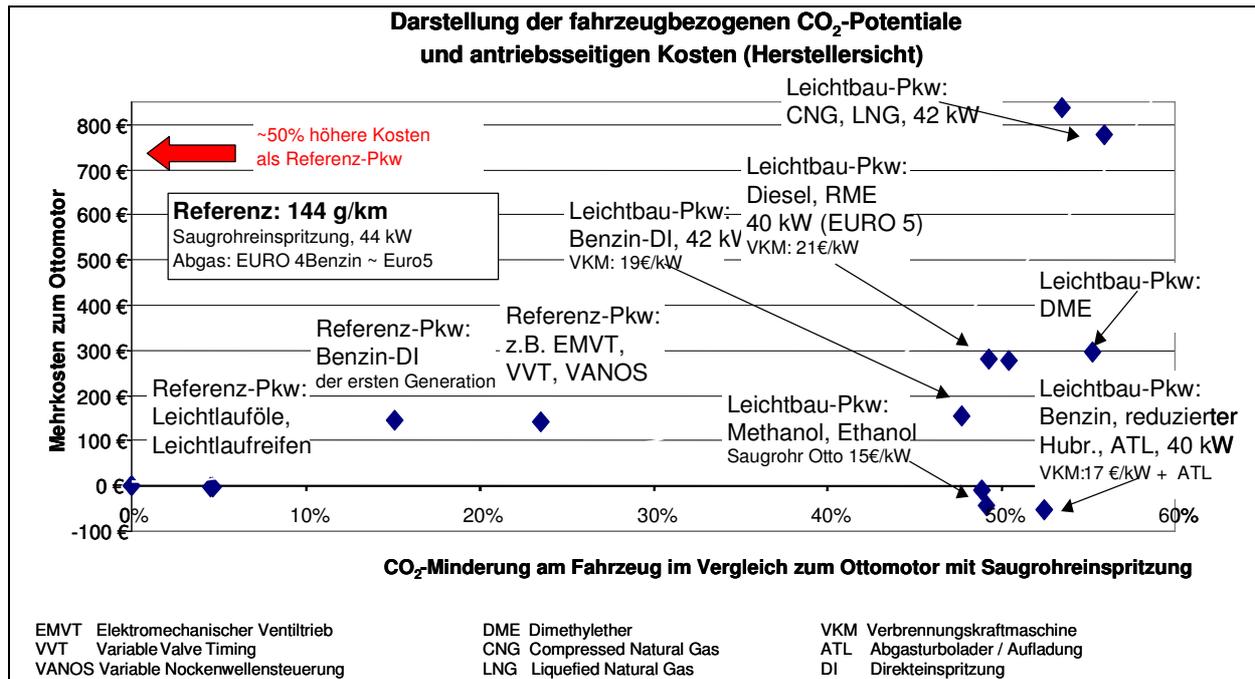


Abb. 4-26: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Mehrkosten der Herstellung von Pkw (Herstellersicht)

Aus Sicht des Automobilherstellers können folgende Ergebnisse auf der Basis der Herstellungskosten und der fahrzeugseitigen CO<sub>2</sub>-Emissionen abgeleitet werden (Abb. 4-26):

- Besonders kosteneffizient ist die Verwendung von Leichtlaufreifen und Leichtlaufölen.
- Die hohen CO<sub>2</sub>-Minderungen im Bereich von 50% sind auch auf die leichtere und aerodynamisch optimierte Fahrzeugkarosserie zurückzuführen. Aus Umweltsicht wird es daher erforderlich sein, zukünftig auch Fahrzeuge anzubieten, die nicht auf eine Maximierung der Fahrzeuggröße und des -gewichtes in der jeweiligen Fahrzeugklasse ausgelegt sind. Weitere Gewichtsoptimierungen sind vorzunehmen.
- Sofern nicht die spezifischen Kosten des Verbrennungsmotors relativ niedrig angesetzt werden, wie zum Beispiel beim Methanolmotor, oder sofern nicht die Motorleistung reduziert wurde, wie zum Beispiel beim hubraumreduzierten Motor mit Abgasturbolader (40 kW), sind die neuen Technologien in der Herstellung meist mit Mehrkosten verbunden.
- Die Darstellung zeigt auch, dass die antriebsbezogenen Mehrkosten neuer Antriebstechnologien leicht 50% der Basiskosten des Referenzfahrzeuges ausmachen können. In diesem Bereich findet sich z.B. das Erdgasfahrzeug.

Betrachtet man nun das gleiche Bild aus gesellschaftlicher Perspektive und berücksichtigt statt der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Fahrzeuge die Klimagasemissionen und statt der Herstellungskosten die volkswirtschaftlich relevanten Kosten der Herstellung und des Fahrzeugbetriebes über die Lebensdauer, so ergibt sich ein deutlich anderes Bild (Abb. 4-27):

- Gegenüber der Referenz werden ebenfalls signifikante Minderungspotentiale erreicht. Es ergeben sich jedoch auch kostenbezogene Einsparungen gegenüber der Referenz, die in den Einsparungen der Treibstoffkosten über die Lebensdauer begründet sind.
- Die Kosteneinsparungen bewegen sich in einem nachvollziehbaren Rahmen. Die günstigste Variante spart höchsten 10% der Kosten des Referenz-Pkw ein.
- Eine im vorhergehenden Bild noch nicht zu erkennenden Variante erscheint in diesem Bild mit dem Diesel-Parallel-Hybridantrieb, ein Konzept, das aus gesellschaftlicher Perspektive an Attraktivität gewinnt.

Beiden Betrachtungsweisen gemeinsam ist, dass sich die Reihenfolge der kosteneffizientesten Maßnahmen zueinander nicht signifikant ändert. Der Vergleich zeigt, dass aus volkswirtschaftlicher Sicht die Mehrkosten der Herstellung dieser Antriebsvarianten durch den geringeren Treibstoffverbrauch mindestens kompensiert werden können.

Aus Herstellersicht mag es zunächst unattraktiv erscheinen, für neue Fahrzeugkonzepte zur CO<sub>2</sub>-Minderung höhere Herstellungskosten in Kauf zu nehmen, um mit dem Fahrzeug allenfalls volkswirtschaftliche Kosteneinsparungen von höchstens 10% anzubieten. Gleichzeitig zeigen die Auswertungen aber auch, dass aus volkswirtschaftlicher Sicht signifikante Klimagasminde- rungen ohne Mehrkosten erreichbar sind.

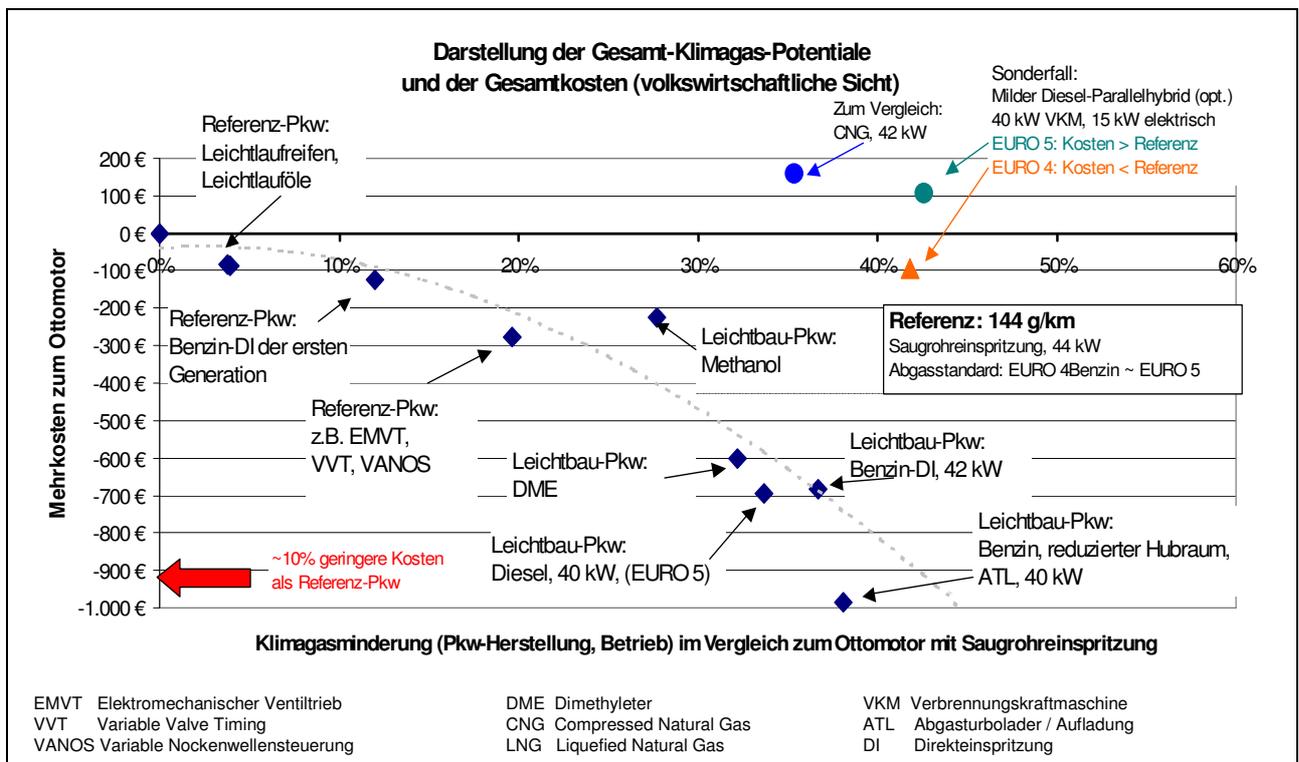


Abb. 4-27: Vergleich der Klimagasemissionen und der Mehrkosten über die Lebensdauer von Pkw (volkswirtschaftliche Sicht)

## 5 Schlussfolgerung und Empfehlung

In dieser Arbeit werden ausgehend von der bestehenden umweltbezogenen Ausgangslage im Straßenverkehr, die stark von der Abgas- und CO<sub>2</sub>-Emissionsproblematik dominiert ist, an Pkw mit unterschiedlichen Antrieben das Bewertungsverfahren der Ökobilanz angewendet und um eine Bewertung der Kosteneffizienz erweitert. Hierfür wird ein umfassendes Modell entwickelt, mit dem die untersuchten Fahrzeuge hinsichtlich Gewicht, Verbrauch und weiterer umwelt- und kostenbezogener Eigenschaften bilanziert werden. Es werden 53 unterschiedliche Antriebs-, Treibstoff- und Abgasstandard-Varianten für Pkw der Kleinwagenklasse hinsichtlich ihrer absoluten Umweltwirkungen und hinsichtlich ihrer Wirkungen im Vergleich zu einem Referenzfahrzeug, einem der 53 Pkw, bewertet. Alle Bewertungen berücksichtigen den Fahrzeugbetrieb einschließlich der Treibstoffbereitstellung, die Umweltwirkungen durch die Herstellung der Antriebe und der Fahrzeugkarosserie.

### 5.1 Gewinner und Verlierer

Ein weitgehend abstrahierter, jedoch nachvollziehbarer Orientierungsmaßstab sind die Rangfolgen der Bewertungsergebnisse im Vergleich zueinander. Dieses Bewertungsinstrument muss gewählt werden, weil weder Emissionsminderungen in einzelnen Kategorien, noch die berechneten Kosten-Nutzen-Verhältnisse aus unterschiedlichen Wirkungskategorien mathematisch verknüpft werden können, um zu einer Gesamtschau der Ergebnisse zu kommen. Je besser ein System in der Kosteneffizienz **und** der Umweltwirkung abschneidet, desto günstiger ist der erreichbare Rang. Bei den Rängen 1-10 handelt es sich in der Regel um aus Umweltschutzsicht sehr günstig bewertete Antriebsvarianten im Vergleich zur Referenz. Aus Sicht der Kosteneffizienz weisen diese Konzepte im Vergleich zur Referenz niedrigere Kosten und gleichzeitig geringere Umweltwirkungen auf (doppelter Nutzen<sup>7</sup>). Bei den Rängen 10-20 können bereits gelegentliche Nachteile wegen höherer Umweltbelastungen in einzelnen Wirkungskategorien möglich sein, oder zunehmende Kosten führen nicht mehr zu einem doppelten Nutzen, sondern nur noch zu einem einfachen Nutzen. Konzepte mit Einordnungen über Rang 20 erweisen sich als deutlich nachteilig, sofern die Vermeidungskosten betrachtet werden. Im Bezug auf die Emissionsminderung ist es möglich, dass diese Konzepte entweder höhere Emissionen in einzelnen Wirkungskategorien aufweisen oder die Minderungsraten nur gering sind.

---

<sup>7</sup> Zu den verwendeten Begriffen bei der Bewertung der Vermeidungskosten wird auf [Abb. 3-2](#) verwiesen.

### Die „TOP 20“ der Kosteneffizienz

Die Ergebnisse zeigen, dass es „den besten Antrieb“ nicht geben kann. Dennoch erfüllen technische Maßnahmen am konventionellen Fahrzeug (z.B. Leichtlaufreifen, Leichtlauföle) und vollkommen veränderte Antriebsvarianten Forderungen hinsichtlich **günstiger Umwelteigenschaften zu niedrigen Gesamtkosten** im Vergleich zur Referenz. Die Rangfolge der Antriebsvarianten und deren Kosteneffizienz ist in Abb. 5-1 dargestellt.

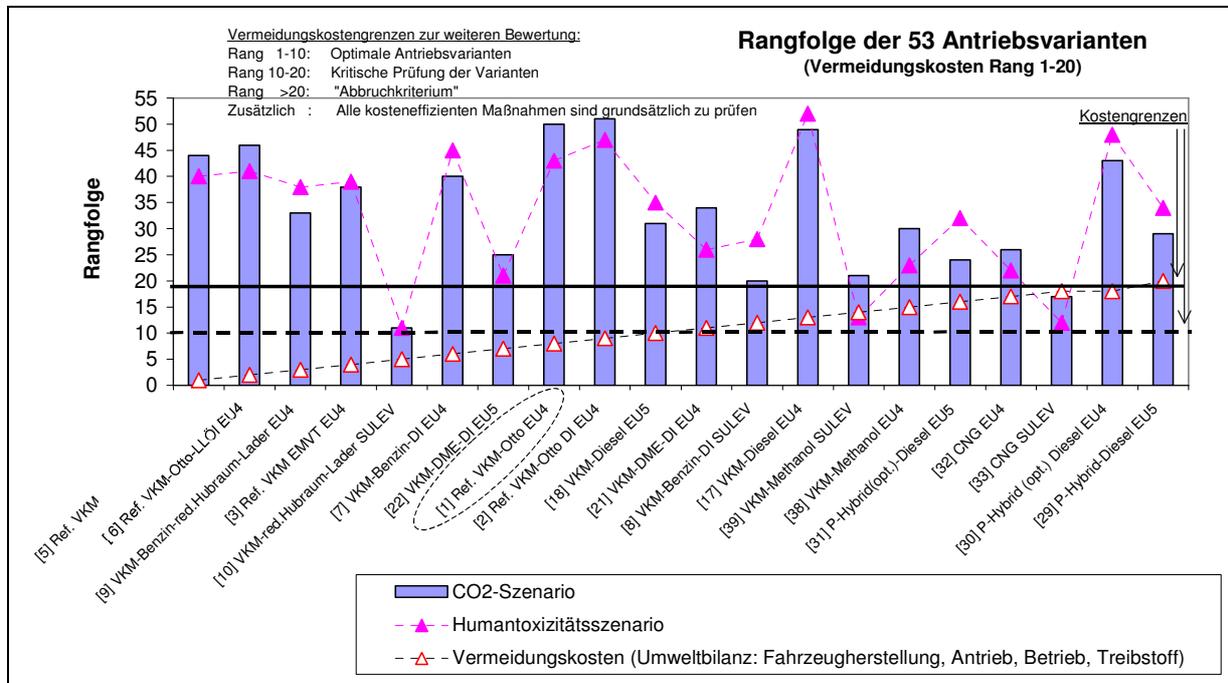


Abb. 5-1: Rangfolge der kosteneffizientesten Maßnahmen im Vergleich

Dabei bleibt jedoch zu berücksichtigen, dass eine Vielzahl von Parametern die Ergebnisse beeinflussen. Ein alternatives Antriebskonzept wird bei der Bewertung der Kosteneffizienz in der Wirkungskategorie sehr ungünstig bewertet, falls es ungünstigere Umwelteigenschaften als die Referenz besitzt. Das kann z.B. bei der Erfüllung des Standards EURO 4 (Diesel) der Fall sein. Diese Nachteile heben sich mit dem Standard EURO 5 auf, so dass dieses Konzept trotz eventuell höherer Kosten eine günstigere Position im Bezug auf die Kosteneffizienz erreicht, da in den maßgeblichen Wirkungskategorien die Umweltwirkungen der Referenz unterschritten werden.

Alle Maßnahmen am konventionellen Benzinmotor gehören zu den kosteneffizientesten Maßnahmen, obwohl die Rangfolge bei einer Betrachtung der Potentiale der CO<sub>2</sub>-Minderung relativ ungünstig erscheint. Einerseits müssen sich diese eher konventionellen verbrauchssenkenden Maßnahmen mit Zukunftsoptionen, wie z.B. Wasserstoff aus erneuerbaren Energieträgern, messen lassen. Andererseits ist jede kosteneffiziente Maßnahme mit gleichzeitigem Umwelt- und Kostennutzen unabhängig von der Quantifizierung des Minderungspotentiales umgehend umzusetzen.

Sehr günstige Ergebnisse in Bezug auf die Umweltszenarien und auch im Bezug auf die Kosten-Nutzen-Analyse weist das motortechnische Downsizing-Konzept auf, das dem SULEV Standard

genügt. Gleichwohl stellt sich wiederum die zu Beginn der Arbeit aufgeworfene Frage, wie niedrig die Emissionen zukünftiger Pkw aus lufthygienischer Sicht tatsächlich sein müssen. Sofern der EURO 4 Standard für Benzin-Pkw oder ein vergleichbarer EURO 5 Standard ausreicht, werden weitgehend homogen betriebene Benzin-Direkteinspritzer (EURO 4) und Dieselmotoren (EURO 5) zu den aussichtsreichsten Antrieben gehören.

Zu den aus Umweltschutzsicht sehr positiv zu beurteilenden neuartigen Antrieben und Energieträgern gehören fast alle Energieträger, die auf Basis von Erdgas hergestellt und in optimierten (monovalenten) Verbrennungsmotoren genutzt werden können, z.B. Dimethylether (DME), das im Druckspeicher getankt und in Dieselmotoren verbrannt werden könnte, Methanol, das in optimierten Verbrennungsmotoren verwendet wird, oder Druckerdgas, das in Ottomotoren genutzt wird.

Ein weiteres bemerkenswertes Ergebnis ist die Position, die der optimierte Parallelhybrid-Antrieb mit Dieselerbrennungsmotor und Abgasstandard EURO 5 erreicht. Sofern diese Variante eine optimal dimensionierte Motor-/Generator-Einheit besitzt und eine Batterie mit geringem Energieinhalt bei hoher Zyklenfestigkeit, kann das System eine interessante Option gegenüber der Referenz sein. Da sich dieses Konzept jedoch auch gegenüber konventionellen Dieselantrieben behaupten muss, können Hybridantriebe nur dann deutlich Vorteile zeigen, falls mit diesen Varianten weitere Vorteile für die Umwelt und den Kunden verbunden sind. Insgesamt hebt sich das Konzept in der hier vorgestellten Gesamtschau nämlich nur wenig vom zukünftigen Dieselmotor ab.

#### Die „TOP 20“ der Umweltwirkung

Zu vollkommen unterschiedlichen Ergebnissen führt die Auswertung in der Gesamtschau der 53 Antriebsvarianten, sofern die Fahrzeuge mit den **geringsten Umweltwirkungen** bewertet werden. Niedrige Emissionen werden sehr stark durch treibstoffspezifische Eigenschaften bestimmt. Die Rangfolgen der besten 20 Antriebsvarianten sind in Abb. 5-2 dargestellt. Die Reihenfolge orientiert sich an deren Umweltwirkung im CO<sub>2</sub>-Schwerpunktszenario.

Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen in Brennstoffzellen oder Verbrennungskraftmaschinen erfüllt unabhängig vom Speicherverfahren, flüssig oder komprimiert, die besten Umweltstandards. Zusätzliche Vorteile durch den wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenantrieb sind jedoch ebenfalls erkennbar. Sofern Wasserstoff aus Erdgas hergestellt wird und unter Druck gespeichert wird, erreicht der Brennstoffzellenantrieb immer noch eine sehr gute Gesamtposition im Vergleich zu allen anderen Antrieben.

Die treibstoffspezifischen Vorteile von Biomethanol aus Holz und Bioethanol aus Zuckerrüben führen scheinbar zu sehr günstigen Ergebnissen. Eine Überprüfung der Einzelergebnisse in den Wirkungskategorien zeigt, dass der sehr gute Rang wegen der sehr niedrigen Klimagasemissionen und des sehr niedrigen Primärenergieverbrauches erreicht wird. In allen anderen Wirkungskategorien führt Biomethanol zu höheren Umweltwirkungen als die Referenz. Immer noch höhere Emissionen weist die serielle Hybridvariante mit Brennstoffzelle im Methanolbetrieb in den Kategorien stratosphärischer Ozonabbau und Versauerung auf, da maßgeblich die Bilanz der Leichtbaufahrzeugkarosserie das Ergebnis beeinflusst. Dies gilt auch für den hub-

raumreduzierten, aufgeladenen Benzinantrieb, dessen Bilanz ebenfalls durch den Leichtbau beeinflusst wird, der sich dabei immer noch gegenüber dem Brennstoffzellenantrieb mit Reformern und Methanol behaupten kann.

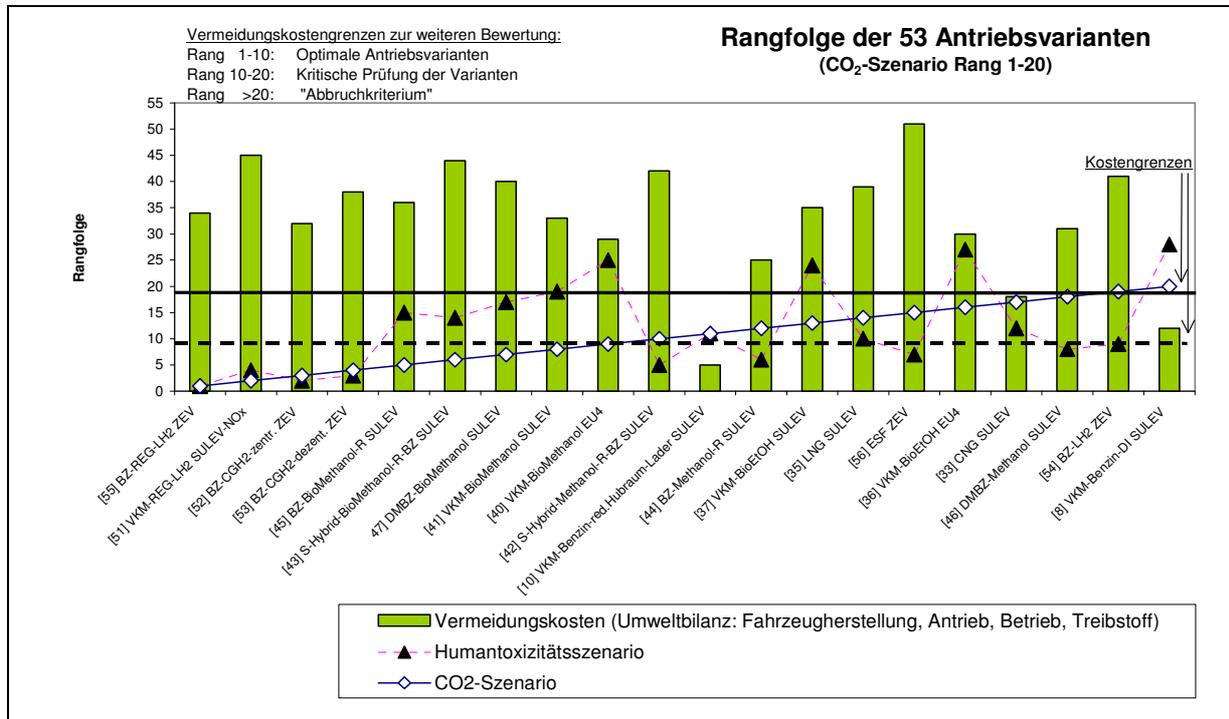


Abb. 5-2: Rangfolge der günstigsten Maßnahmen mit Schwerpunkt „CO<sub>2</sub>-Minderung“ im Vergleich

Brennstoffzellen und batterieelektrische Antriebe nutzen nicht nur die treibstoffspezifischen Vorteile. Sie zeigen auch dann Vorteile, sofern sie die Energie umsetzen können, auf die sie optimiert sind. So führt die Nutzung von Flüssigwasserstoff aus Erdgas allein in Brennstoffzellen zu einem günstigen Ergebnis. Ebenso wird die Anwendung von Methanol in Brennstoffzellen günstiger bewertet als die Anwendung in Verbrennungskraftmaschinen. Gleiches gilt für die Nutzung des Stroms von überwiegend fossilen Primärenergieträgern in den Elektroantrieben der batterieelektrischen Pkw.

Aber auch der Benzin-Direkteinspritzer nimmt als zweiter Benzinantrieb eine sehr gute Position ein. Im Vergleich zu den Wasserstoffantrieben mit Nullemission sind seine Partikelemissionen immer noch kritisch zu bewerten, die in erster Näherung für den SULEV Standard gegenüber dem Stand EURO 4 um die Hälfte gesenkt werden. Es ergibt sich daher im Szenario mit schwerpunktmäßiger Bewertung der Humantoxizität lediglich ein durchschnittlicher Platz.

Die Vorteile niedrigster Emissionen werden bei vielen Varianten nur mit höchsten Kosten erreicht. Einzig die fortschrittlichen SULEV-Verbrennungskraftmaschinen im aufgeladenen otto-motorischen Benzinbetrieb und mit Benzin-Direkteinspritzer sind kosteneffiziente Lösungsansätze mit doppeltem Nutzen. Der CNG-Antrieb erreicht teilweise Emissionsminderungen zu noch vertretbar niedrigen Vermeidungskosten. Der Methanolmotor, dessen Alkohol aus Erdgas

hergestellt ist, erreicht sowohl im CO<sub>2</sub>-Szenario als auch bei der Bewertung der Kosteneffizienz den 21. Rang und wird somit in den Darstellungen gerade nicht mehr berücksichtigt.

### Die „20 Schwächsten“ der Umweltwirkung

Die Rangfolge der 20 ungünstigsten Antriebsvarianten sind in Abb. 5-3 dargestellt. Die Reihenfolge orientiert sich an deren Umweltwirkung im CO<sub>2</sub>-Schwerpunktszenario. Diese können in zwei Gruppen unterteilt werden:

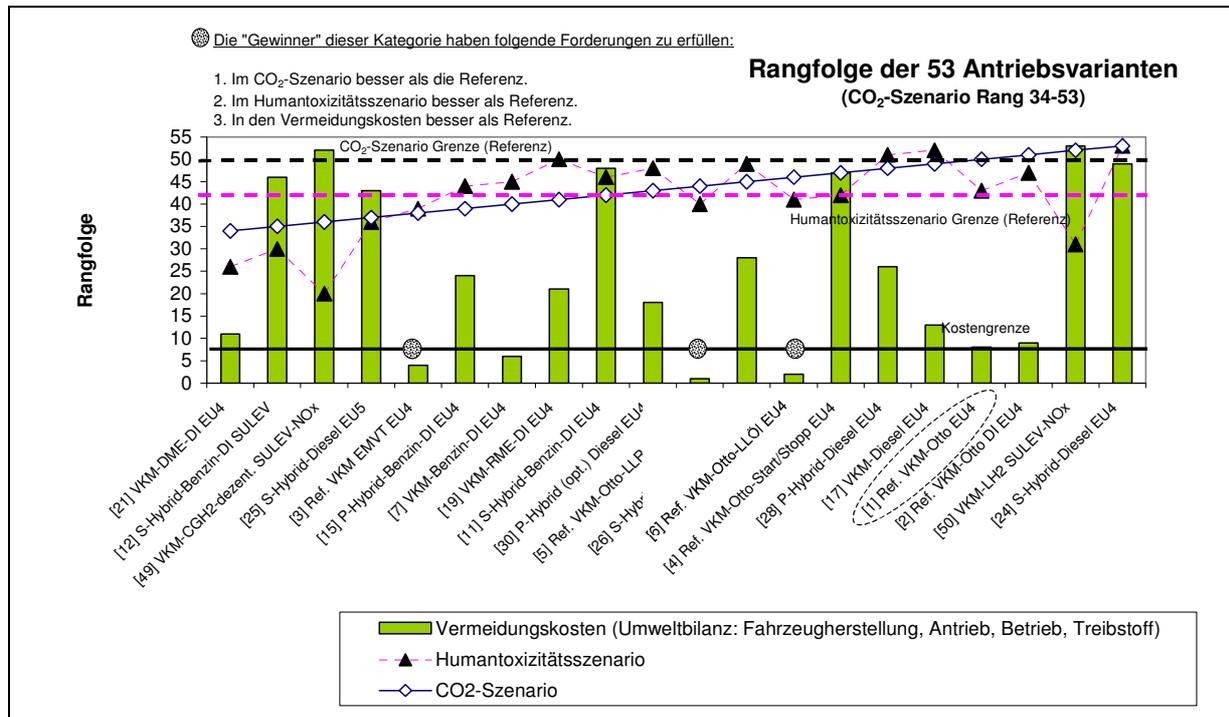


Abb. 5-3: Rangfolge von Maßnahmen mit niedrigen Minderungen im Schwerpunkt „CO<sub>2</sub>-Minderung“ im Vergleich

Zunächst in die Gruppe der Antriebe, die in der Umweltbewertung noch ungünstiger abschneiden als die Referenz. Dies sind Benzin-DI der ersten Generation und serielle Diesel-Hybridantriebe (EURO 4). Flüssigwasserstoff aus Erdgas erreicht einen günstigen Rang bei einer Bewertung humantoxischer Emissionen, schneidet jedoch im CO<sub>2</sub>-Szenario ungünstiger ab als die Referenz. Demgegenüber besitzen einige serielle Hybridantriebe mit Benzin-DI Motoren und Dieselmotoren, auch bei Verwendung von RME, zwar Vorteile im CO<sub>2</sub>-Szenario gegenüber der Referenz, jedoch eindeutige Nachteile im Humantoxizitätsszenario, falls sie nur dem Standard EURO 4 genügen.

In der verbleibenden Gruppe finden sich die Konzepte mit niedrigeren Umweltwirkungen und niedrigeren Kosten als die Referenz. Dies ist die beispielhafte Anwendung des elektromechanischen Ventiltriebes am Referenzfahrzeug, der fortschrittliche Benzin-DI Motor mit Abgasstandard EURO 4, sowie die Verwendung von Leichtlaufreifen und Leichtlaufölen.

### Die Gesamtgewinner

Um die günstigsten Varianten zu ermitteln, gilt, dass alle Rangfolgen der besten Antriebe unter allen Umständen besser sein sollen als der Rang der Referenz. Die folgende Tab. 5-1 fasst die im Vergleich zur Referenz aus Umweltnutzen- und Kosten-Nutzen-Sicht am besten bewerteten Pkw zusammen. Grundsätzlich sind alle Fahrzeuge, deren Kosten-Nutzen-Bilanz unter Berücksichtigung der umweltbezogenen Betriebsbilanz einen besseren Rang als der Referenz-Pkw erlangt, zu empfehlen. Die besten Fahrzeuge können dann die mit dem besten Umweltrang sein, da sie mit dem maximal möglichen Potential zur Reduzierung der Umweltbelastungen bei hoher Kosteneffizienz verbunden sind.

Tab. 5-1: Zusammenfassung der besten technischen Maßnahmen und zukünftigen Antriebe mit einer gesamtheitlichen Verbesserung (Umweltnutzen und Kosten-Nutzen) gegenüber dem heutigen Referenz-Pkw

Antrieb Lfd.-Nr. in eckigen Klammern	Schwerpunkt der Umweltbilanz	Rangfolge nach Umwelt-Nutzen		Rangfolge nach Kosten-Nutzen	
		CO <sub>2</sub>	Humantoxizität	Betrieb, Treibstoff, Kfz-Herstellung <sup>1)</sup>	Betrieb, Treibstoff <sup>1)</sup>
1. Benzin-Hubred.-Lader, SULEV	[10]	11	11	5	4
2. Benzin-Direkteinspritzer, SULEV	[8]	20	28	12	5
3. Methanolmotor, SULEV	[39]	21	13	14	12
4. Dieselmotor, DME, EURO 5	[22]	25	22	7	10
5. Methanolmotor, EURO 4B	[38]	30	23	15	11
6. Dieselmotor, EURO 5	[18]	31	35	10	9
7. Benzin-Hubred.-Lader, EURO 4B	[9]	33	38	3	1
8. Dieselmotor, DME, EURO 4B	[21]	34	26	11	8
9. Referenz, elektromechan. Ventil	[3]	38	39	4	6
10. Referenz, Leichtlaufreifen	[5]	44	40	1	2
11. Referenz, Leichtlauföl	[6]	46	41	2	3
<b>12. Referenz, Ottomotor, EURO 4B</b>	<b>[1]</b>	<b>50</b>	<b>43</b>	<b>8</b>	<b>15</b>

<sup>1)</sup> Kostenbilanz berücksichtigt Gesamtkosten, Umweltbilanz berücksichtigt Gesamtbilanz oder Betriebsbilanz

- Der fortschrittliche Benzin-Direkteinspritzer, EURO 4B [7], entfällt wg. 45. Rang im Humantoxizitätsszenario.
- Der fortschrittliche Dieselmotor, EURO 4D [17], entfällt wg. 52. Rang im Humantoxizitätsszenario.
- Der Benzin-Direkteinspritzer der ersten Generation, EURO 4B [2], entfällt wg. Rang 51 im CO<sub>2</sub>-Szenario und Rang 47 im Humantoxizitätsszenario.

## 5.2 Abschließende Empfehlung

Die aussichtsreichsten Antriebe der Zukunft werden mit flüssigen Energieträgern angetrieben werden. Es können im Vergleich zu heutigen Antrieben deutlich weiterentwickelte Benzin- und Dieselmotoren sein. Die Kraftstoffdirekteinspritzung hat dann Zukunft, sofern die bestehenden Partikelprobleme gelöst werden. Dies kann erst durch eine aktive Abgasnachbehandlung beim Diesel (EURO 5) oder durch einen weitgehenden homogenen Betrieb des Benzin-Direkteinspritzer erfolgen. Andernfalls erreichen die Konzepte höhere humantoxische und kanzerogene Emissionen als heutige Referenzfahrzeuge.

Daneben besitzen Maßnahmen des motortechnischen Downsizings in Kombination mit einer Aufladung sehr attraktive Gestaltungsmöglichkeiten. Auch Maßnahmen der variablen

Ventilsteuerung gehören aus Kosten-Nutzen-Sicht zu den herausragenden motortechnischen Maßnahmen der Verbrauchsminderung.

Aber auch umgehend umsetzbare Lösungsmöglichkeiten, wie die Verwendung von Leichtlaufreifen und Leichtlaufölen (5W30, 0W30) besitzen durch ihre hohe Kosteneffizienz bei breiter Einführung ein nicht zu vernachlässigendes Potential, um besonders Klimagasemissionen zu reduzieren.

Bei den neuen Energieträgern ist die Verwendung von Dimethylether und Methanol aus Erdgas in Verbrennungskraftmaschinen aussichtsreich. Beide Optionen haben den Vorteil, mit einem überschaubaren Applikationsaufwand an bestehende Motoren und Speichersysteme angepasst zu werden und bieten kraftstoffspezifische und motortechnische Potentiale der Emissionsreduktion.

Ob aus lufthygienischer Sicht in den nächsten 20 Jahren eine Abgasminderung notwendig sein wird, die über den Stand EURO 4 (Benzin) oder über eine kraftstoffneutrale Grenzwertstufe EURO 5 hinausgehen wird, ist aus heutiger Sicht nicht abzusehen. Wahrscheinlich erscheint dies zur Zeit nicht. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass die ausgewählten Fahrzeugkonzepte auch bei einer weiteren Abgasminderungsstufe um etwa 80% (SULEV) langfristig hinsichtlich einer Bewertung der Kosteneffizienz aussichtsreich sein werden.

Die Anwendung der Ergebnisse über alle Fahrzeugklassen in Szenariorechnungen mit dem TREMOD-Modell zeigt, dass die kosteneffizientesten technischen Maßnahmen und alternativen Antriebe (Tab. 5-1) das Potential besitzen, im Jahr 2020 gegenüber dem Trendszenario des Pkw-Verkehrs 30% der CO<sub>2</sub>-Emissionen (26,8 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>) einzusparen. Die Ergebnisse sind in Abb. 5-4 zusammengefasst. Für ein mögliches Reduktionsziel in Deutschland von 40% im Jahr 2020 gegenüber 1990 leisten diese kosteneffizienten technischen Maßnahmen immerhin 25%-Punkte für den Pkw-Verkehr. Diese Minderung wäre zudem ohne eine Änderung des Verbraucherverhaltens, etwa durch eine Reduzierung der Fahrleistung des motorisierten Individualverkehrs, möglich. Da alle Varianten im Vergleich zur Referenz niedrigere Kosten und geringere Umweltwirkungen aufweisen (doppelter Nutzen), könnte dieses Potential ohne Mehrkosten gegenüber heutigen Antrieben erschlossen werden, sofern die Herstellungskosten und die reinen Kraftstoffkosten berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse zur Gewichtsoptimierung der Fahrzeugkarosserie zeigen, dass Leichtbau nicht per Definition gegenüber den heutigen Referenzsystemen allein mit Vorteilen verbunden ist. Die hohen, versauernd wirkenden Emissionen der Herstellung beeinflussen die Gesamtbilanz aller zukünftigen Antriebe erheblich.

Die mit Abstand ungünstigsten Ergebnisse in den Umwelt- und Kostenbilanzen ergeben sich für wasserstoffbetriebene Verbrennungsmotoren und serielle Hybridantriebe. Dies gilt auch noch für batterieelektrische Antriebe, sofern deren Kosten berücksichtigt werden. Biogene Energieträger sind entweder relativ teuer (Biomethanol, Bioethanol), oder sie haben Nachteile in der Umweltbilanz (Rapsölmethylester).

Brennstoffzellenantriebe können sich trotz günstiger Zielwerte nicht behaupten. Bevor diese aus Kosten-Nutzen-Gründen einzusetzen wären, bietet es sich an, Druckerddgas in Verbrennungs-

motoren oder optimierte Parallelhybrid-Diesel und -Benziner einzusetzen. Sofern der Wunsch nach einem Wechsel der Energieträger besteht, müsste vorab die Option von optimierten Parallelhybridantrieben mit den Treibstoffen Dimethylether oder Methanol geprüft werden.

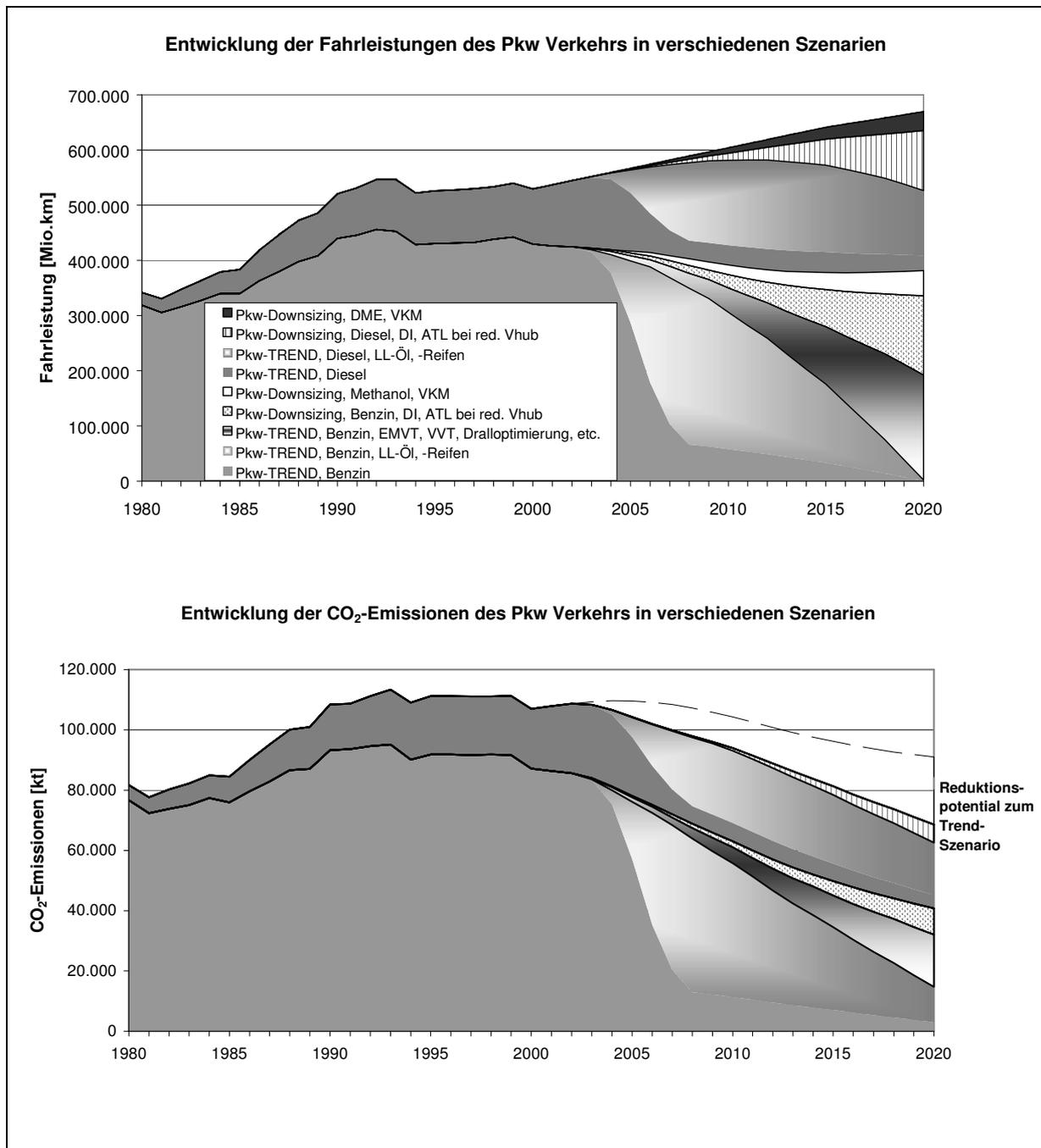


Abb. 5-4: Änderung der Fahrleistungsverteilung und Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch eine Kombination der besten technischen Maßnahmen und zukünftigen Antriebe nach Tab. 5-1





## 6 Verzeichnisse und Begriffsbestimmungen

### 6.1 Literatur

- [1] 70/220/EG Richtlinie 70/220/EWG des Rates vom 20. März 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Abgase von Kraftfahrzeugmotoren mit Fremdzündung
- [2] 91/441/EWG Richtlinie 91/441/EWG des Rates vom 26. Juni 1991 zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Abgase von Kraftfahrzeugmotoren mit Fremdzündung
- [3] 92/97/EWG Richtlinie 92/97/EWG des Rates zur Änderung der Richtlinie 70/157/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über den zulässigen Geräuschpegel und die Auspuffvorrichtung von Kraftfahrzeugen, 10. November 1992
- [4] 93/116/EG Richtlinie 93/116/EG der Kommission zur Anpassung der Richtlinie 80/1268/EWG des Rates über den Kraftstoffverbrauch von Kraftfahrzeugen an den technischen Fortschritt, 17. Dezember 1993
- [5] 94/12/EG Richtlinie 94/12/EG des Rates vom 23. März 1994 zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Abgase von Kraftfahrzeugmotoren mit Fremdzündung
- [6] 98/69/EG Richtlinie 98/69/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und zu Änderung der Richtlinie 70/220/EWG des Rates, 13. Oktober 1998
- [7] 98/70/EG Richtlinie 98/70/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren und zur Änderung der Richtlinie 93/12/EG des Rates, 13. Oktober 1998
- [8] 1999/96/EG Richtlinie zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe und luftverunreinigender Partikel aus Selbstzündungsmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen und die Emission gasförmiger Schadstoffe aus mit Erdgas oder Flüssiggas betriebenen Fremdzündungsmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 88/77/EG des Rates;  
Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Dezember 1999
- [9] 1999/100/EG Richtlinie 1999/100/EG der Kommission zur Anpassung der Richtlinie 80/1268/EG über die Kohlendioxidemissionen und den Kraftstoffverbrauch von Kraftfahrzeugen an den technischen Fortschritt;  
Richtlinie der Kommission vom 15. Dezember 1999
- [10] 2001/43/EG Richtlinie 2001/43/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 92/23/EG des Rates über Reifen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern und über ihre Montage;  
Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Juni 2001
- [11] Aberle, G.,  
Holoher, K. H.: Vergleichende Wegerechnungen und Verkehrsinfrastrukturpolitik, Schriftenreihe des Verbandes der Automobilindustrie (VDA) e. V., Band 46; Frankfurt 1984

- [12] Acurex Environmental, Arthur D. Little, Inc. Powars, C., Moyer, C., Luscher, D., Lowell, D., Pera, C., A Comparison of LNG, CNG and Diesel transit Bus Economics, Topical Report, July 1992-September 1993, Prepared for Gas Research Institute, Contract No. 5091-292-2153, October 20<sup>th</sup>, 1993; Mountain View, CA 1993
- [13] Acurex Environmental, Arthur D. Little, Inc. Unnasch, S. et al., Evaluation of Fuel-Cycle Emissions On A Reactivity Basis, Volume 1 – Main Report, ARB Contract No. A166-134, prepared for California Air Resources Board, September 19<sup>th</sup>, 1996; Mountain View, CA 1996
- [14] Acurex Environmental, Arthur D. Little, Inc. Unnasch, S., Browning, L., Draft Final Report Refinement of Selected Fuel-Cycle Emissions Analyses, ARB Contract Number 98-338, Prepared for California Air Resources Board, Research Division and South Coast Air Quality Management District, February 9<sup>th</sup>, 2000; Mountain View, Sacramento, CA 2000
- [15] Acurex Environmental, Arthur D. Little, Inc., Arcadis Geraghty & Miller, Inc. Unnasch, S., Browning, L., Fuel Cycle Energy Conversion Efficiency Analysis, Status Report, prepared for California Energy Commission Transportation Technology and Fuels Office and Air Resources Board, Research Division, May, 25<sup>th</sup>, 2000; Sacramento 2000
- [16] ADAC Gauss, C., Knöfel, Scheithauer, R., Klanner, W., Motoren mit Diesel-Direkteinspritzung und neuer Partikelfiltertechnik: Vergleich der neuen Partikelfiltertechnik mit herkömmlicher Technologie, Dauerhaltbarkeit dieser Filtertechnik, interner Testbericht, August 2001; München / Landsberg 2001
- [17] ADAC Veröffentlichung des ADAC, März 2002; München 2002
- [18] Apel, D. et al. Handbuch für kommunale Verkehrsplanung, Dieter Apel (Hrsg.), Loseblatt-Ausgabe, Grundwerk, Stand: August 1992, Bonn Economica Verlag, ISBN3-87081-112-9; Bonn 1992
- [19] Apel, D. Forschungsverbund Lebensraum Stadt; Berlin 1994
- [20] Apel, D. Leistungsfähigkeit und Flächenbedarf der städtischen Verkehrsmittel, Kap. 2.5.1.1, Handbuch der Kommunalen Verkehrsplanung, Grundwerk, 1996, Bonn Economica Verlag; Bonn 1996
- [21] Aral Nierhaube, B., „Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie“, Erdöl-Erdgas-Kohle, Bd. 116(9), 2000, 451-455
- [22] Argonne National Laboratory; U.S. Department of Energy Stodolsky, F., Gaines, L., Marshall, C.L., An, F., Eberhardt, J.J., Total Fuel Cycle Impacts of Advanced Vehicles, SAE-Paper No. 1999-01-0322, March 1-4, 1999; Detroit, Michigan 1999
- [23] AVL GmbH Ellinger, R., Kapus, P., Schweinzer, F., Prenninger, P., „Erfüllung zukünftiger Limitierungen des CO<sub>2</sub>-Flottenverbrauchs mittels Downsizing“, HdT-Paper: Downsizingkonzepte für Otto- und Dieselfahrzeugmotoren, Haus der Technik, 26./27.06.2000; Essen 1998
- [24] AVL Powertrain Technologies, Inc. McCandless, J., “DME as an Automotive Fuel: Technical, Economic and Social Perspectives” Presentation at Energy Frontiers International Conference on "Gas to Market/GTL", October 31<sup>st</sup>-November 1<sup>st</sup>, 2001; San Francisco, 2001
- [25] Becker, K. Die Einführung bleifreien Benzins als notwendige Voraussetzung für eine deutliche Minderung der Verkehrsemissionen, PHOENIS INTERNATIONAL; Berlin 1984

- [26] Becker, K. Verminderung der Pkw-Schadstoffemissionen, Der weite Weg nach Luxemburg, GIT Supplement, GIT Verlag; Berlin, 1/1989
- [27] Bergmann, M., Bracher, T., Diegmann, V., Uricher, A., Wiegand, G., Wyss, U. Least Cost Planning im Verkehr, Schlussbericht des Subprojektes SP 3 im Forschungsverbund CITYmobil; Freiburg/Berlin/Darmstadt 1997
- [28] Blandow, V., Zittel, W. Ökologische Bilanzierung von Elektrofahrzeugen im Vergleich mit konventionell betriebenen Fahrzeugen, Untersuchung eines BMW316 mit Benzin- und Elektromotor, Studie im Auftrag der BMW AG, Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH, 8. Oktober 1991, Ottobrunn 1991
- [29] Berner, H.-J., Bargende, M. "Erdgas als alternativer Kraftstoff ein Überblick", VDI-Bericht 1565, Paper: Innovative Fahrzeugantriebe, Beigabe; Düsseldorf 1998, 1-21
- [30] Blümel, H. "Nur noch Batterie- oder Hybrid-Antriebe in die Städte? - Eine vergleichende Betrachtung aus Sicht der Luftreinhaltung", VDI-Bericht 1020, Paper: Aspekte alternativer Energieträger für Fahrzeugantriebe; Düsseldorf 1992, 79-112
- [31] Böcker, A., Klöß, M. Neues Tankkonzept für LEV II und pZEV-Fahrzeuge, Sonderausgabe von ATZ Automobiltechnische Zeitschrift und MTZ Motortechnische Zeitschrift, System Partners 2001, 48-51; Wiesbaden 2001
- [32] Brachmann, T. „HONDA insight Technik“, IIR-Fachkonferenz: Innovative Antriebstechnologien im Automobil, 28.-30.03.2001; München, Sulzbach/Ts. 2001
- [33] Braess, H.-H., Seiffert, U. Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1. Auflage Oktober 2000; Braunschweig, Wiesbaden 2000
- [34] Brück, R. et. al. Die Notwendigkeit des optimalen Zusammenwirkens von Abgasnachbehandlungssystemen zur Erfüllung der SULEV-Gesetzgebung, HdT-Paper: Zukünftige Abgasgesetzgebung in Europa und USA, Haus der Technik, 9./10.11.1998; Essen 1998
- [35] Brüske-Hohlfeld, I., Ahrens, W., Möhner, M., Jöckel, K.H., Pohlabein, H., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Heinrich, J. „Lungenkrebsrisiko durch Dieselmotoremissionen“, aus: Psychomentele Belastungen und Beanspruchungen im Wandel von Arbeitswelt und Umwelt. Kanzerogenese und Synkanzerogenese; Dokumentationsband über die 37. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V., Borsch-Galetke E., Struwe F. (Hrsg.), Rindt-Druck Fulda; Wiesbaden 12.-15.05.1997, 167-171
- [36] BMW AG Eichlseder, H., Baumann, E., Flick, W., Müller, P., „Benzin Direkteinspritzung – Chancen und Risiken im Hinblick auf zukünftige Emissionszenarien“, Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 1999, 4.-6. Oktober 1999; Aachen 1999, 749-772
- [37] BMW AG BMW and the Transport Energy Strategy, Papers given for the Californian Air Resources Board, <http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/CleanEnergy/Huss.pdf>
- [38] Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung Jahresergebnisse Siedlungsflächenentwicklung 1999, Der Flächenverbrauch in Deutschland hat sich intensiviert, 27. September 2000; Bonn 2000

- [39] BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft Habersatter, K., Ökobilanzen von Packstoffen, Stand 1990, Schriftenreihe „Umwelt“ Nr. 132 des BUWAL; Bern 1991
- [40] BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft Ökopprofile von Treibstoffen, Luft Umweltmaterialien Nr. 104, 1998; Bern 1998
- [41] BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft NOREM, Database for non-regulated emissions from motor vehicles, Version 2.0, CD-Rom; Bern 1998
- [42] BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft de Haan, P., Keller, M., Real-world driving cycles for emission measurements: ARTEMIS and Swiss cycles, Final report, veröffentlicht in: Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs, Folgearbeiten zum BUWAL-Bericht SRU Nr. 255, Arbeitsunterlage 25, 17. März 2001; Bern 2001
- [43] Bundesgesetzblatt Verordnung über die Entsorgung von Altfahrzeugen und die Anpassung straßenrechtlicher Vorschriften vom 4. Juli 1997, Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1997, Teil I, Nr. 45; Bonn am 10. Juli 1997; Bonn 1997
- [44] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Nachhaltige Entwicklung in Deutschland, Entwurf eines umweltpolitischen Schwerpunktprogramms; April 1998; Bonn 1998
- [45] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Erneuerbare Energie und Nachhaltige Entwicklung, Natürliche Ressourcen – Umweltgerechte Energieversorgung; Bonn 1999
- [46] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Modellhafter Einsatz von Gasfahrzeugen, Abschlußbericht, August 2001; Bonn / Berlin 2001
- [47] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Nachhaltige Mobilität, Leitlinien des Bundesumweltministeriums, Juli 2002; Bonn / Berlin 2002
- [48] Bundesministerium für Verkehr 5. Fortschreibung des Berichts über die Förderung des Einsatzes von Elektrofahrzeugen (mit Batterie); unveröffentlichter Entwurf eines Berichtes des BMV an den Verkehrsausschuss des Deutschen Bundestages, FE-Projekt-Nr. 70466/95 (siehe [132]), 06.05.1998; Bonn 1998
- [49] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie Energie Daten 2000, Nationale und internationale Entwicklung, Juli 2000; Berlin 2000
- [50] Bundesregierung Nationales Klimaschutzprogramm, Fünfter Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe „CO<sub>2</sub>-Reduktion“, Beschluss der Bundesregierung vom 18. Oktober 2000 Berlin 2000
- [51] CARB, California Air Resources Board Passenger Car & LDT1: Incremental Cost of a SULEV Compared to a ULEV I Vehicle, Tables and Cost Estimates, 12-Apr-2002 20:03; <http://arbis.arb.ca.gov/regact/levii/levcost.pdf> Sacramento, CA 1998/2002
- [52] Carbotech Inc. Wunderlin, D., Schläpfer, K., NOREM 2.0, Database for non-regulated emissions for motor vehicles; Basel 1998
- [53] Choudhury, R. et al. GM Well-to-Wheel Analysis of Energy and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A European Study, LB-Systemtechnik GmbH, 27.09.2002; <http://www.lbst.de/gm-wtw> Ottobrunn 2002
- [54] Clean Fuels Report “Methanol Use In US Small, But Cost Competitive With Gasoline”, The Clean Fuel Report, Economics, June 2000

- [55] CML, Centrum voor Milieu-  
kunde Heijungs, R., Guinée, J. B., Huppés, G., Lamkreijer, R. M., Udo de Haes, H. A., Wegener Sleswijk, A., Ansems, A. M. M., Eggels, P. G., van Duin, R., de Goede, H. P., Environmental Life Cycle Assessment of Products, Guide (Part 1) and Backgrounds (Part 2), CML, TNO and B&G; Leiden 1992
- [56] CONCAWE, Conservation of Clean Air and Water in Europe (the oil companies' European organization for environment, health and safety) Hutcheson, R.C., Alternative Fuels in the Automotive Market, Prepared for the Concauwe Automotive Emissions Management Group by its Technical Coordinator, Concauwe Report 2/95, October 1995; Brussels 1995
- [57] CONCAWE, Conservation of Clean Air and Water in Europe (the oil companies' European organization for environment, health and safety) Cremer, G., et al., Effect of Product Quality Changes on Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions from European Refineries, Concauwe Report ; 6/95, ISSN 0166-0810; Brussels 1995
- [58] COST 319, European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research Estimation of pollutant emissions from transport, Proceedings of the workshop, ULB, Interim Report of the Action, 27-28 November 1995; Brüssel-Luxemburg 1995
- [59] COST 319, European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research Estimation of pollutant emissions from transport, Final Report of the Action, ISBD 92-828-6797-8, 1999; Brüssel-Luxemburg 1999
- [60] Council of the European Union (Transport) Council Strategy on the integration of environment and sustainable development into the transport policy submitted by the "Transport" Council of the European Union, Document 11717/99, TRANS 197, ENV 335, 6 October 1999; Brussels, 11 October 1999
- [61] Daimler Benz AG Neue und alte Antriebskonzepte gegenübergestellt, Energie, Abgase, Reichweite – Antriebe im Vergleich, Presse-Information PRi\_0265.DOC, Presse Forschung und Technik (K/U), 12. Mai 1997; Stuttgart 1997
- [62] DAUG, Deutsche Automobilgesellschaft mbH Angebotsschreiben der Deutschen Automobilgesellschaft mbH für eine (118V/100Ah)-Traktionsbatterie FNC-CITYtrak H100, BMU - IG I6-51023-1/0, 25.07.1994; Esslingen 1994
- [63] DAUG, Deutsche Automobilgesellschaft mbH Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen und Energieversorgung für Elektrofahrzeuge durch Solarenergie und Stromtankstellen, gefördert vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie und dem Wirtschaftsministerium des Landes Mecklenburg-Vorpommern, Förderkennzeichen: TV 9225, 0329376A, Dezember 1996; Braunschweig 1996
- [64] De Cicco, J., M. Technology Status and Commercialization Prospects of Fuel Cells for Highway Vehicles, Review Draft, American Council for an Energy-Efficient Economy, September 2000; Washington D.C. 2000
- [65] Demuß, L. Technologische Veränderungen beim Übergang vom konventionellen Antriebsstrang zur mobilen Brennstoffzelle; Abschlußbericht zum Verbundforschungsprojekt „Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle – Chancen und Risiken für die baden-württembergische Industrie“ Karlsruhe, Februar 2000, 111-176
- [66] Derwent, R.G., Jenkin, M.E., Saunders, S.M. Photochemical ozone creation potentials for a large number of reactive hydrocarbons under European conditions, Atmospheric Environment, 30 (1996) 181-199

- [67] Deutsche Bundesregierung Umweltschutz – Das Umweltprogramm der Bundesregierung, Verlag W. Kohlhammer; Stuttgart 1972
- [68] Deutscher Bundestag Dritte Fortschreibung des Berichtes über die Förderung des Einsatzes von Elektrofahrzeugen, Unterrichtung durch die Bundesregierung, 11. Wahlperiode, Drucksache 11/5013; Bonn, 27.07.89
- [69] Deutscher Bundestag Vierte Fortschreibung des Berichtes über die Förderung des Einsatzes von Elektrofahrzeugen, Unterrichtung durch die Bundesregierung, 12. Wahlperiode, Drucksache 12/3222; Bonn, 07.09.92
- [70] Deutscher Bundestag Stichwort Nachhaltigkeit; Die Ergebnisse der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt. Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“ im 13. Deutschen Bundestag, März 2000; Berlin 2000
- [71] Deutscher Bundestag Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (19. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung, Technikfolgenabschätzung, hier: TA-Projekt „Brennstoffzellen-Technologie“, 14. Wahlperiode, Drucksache 14/5054; Berlin, 08.01.2001
- [72] Deutsche Shell AG Auto und Umwelt, Shell Briefing Service 2/1992 Hamburg 1992
- [73] DLR, Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Fischer, M., Nitsch, J., Schnurnberger, W., Technischer Stand und wirtschaftliches Potential der Brennstoffzellen-Technologie im internationalen Vergleich, Gutachten im Rahmen des Monitoring-Vorhabens des TAB, Institut für Technische Thermodynamik, Oktober 1997; Stuttgart 1997
- [74] DLR, Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Carpetris, C., Energie- und Schadstoffbilanzen von Elektrofahrzeugen mit Batterien und/oder Brennstoffzellen-Antrieben im Vergleich zu Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor, DLR-97 44417 IB 404, STB-Bericht 16, Dezember 1997; Stuttgart 1997
- [75] DLR, Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Carpetris, C., Globale Umweltvorteile bei Nutzung von Elektroantrieben mit Brennstoffzellen und/oder Batterien im Vergleich zu Antrieben mit Verbrennungsmotor, DLR-IB-200044417400, STB-Bericht 22, April 2000; Stuttgart 2000
- [76] DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Pehnt, M., Dienhart, H., Nitsch, J., Analyse von Einsatzmöglichkeiten und Rahmenbedingungen verschiedener Brennstoffzellensysteme in Industrie und zentraler öffentlicher Stromversorgung, Gutachten im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Schwerpunkt Energietechnik, Institut für Technische Thermodynamik, November 1999; Stuttgart 1999
- [77] DLR, Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Pehnt, M., Ökologische Nachhaltigkeitspotenziale von Verkehrsmitteln und Kraftstoffen, Teilbericht und Materialband im Rahmen des HGF-Projektes "Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland", STB-Bericht 24, Juni 2001; Stuttgart 2001
- [78] DLR / WI, Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. / Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie Fishedick, M., Nitsch, J., et al., Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland, Forschungsprojekt für das Umweltbundesamt, UFOPLAN FKZ Nr. 200 97 104, Endbericht, April 2002; Wuppertal, Stuttgart 2002

- [79] DIN EN ISO 14040      DIN EN ISO 14040 Umweltmanagement – Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen, Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth-Verlag; Berlin 1997ff
- [80] DIN EN ISO 14041      DIN EN ISO 14041 Umweltmanagement – Ökobilanz – Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz, Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth-Verlag; Berlin 1997ff
- [81] DIN EN ISO 14042      DIN EN ISO 14042 Umweltmanagement – Ökobilanz – Wirkungsabschätzung, Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth-Verlag; Berlin 1997ff
- [82] DIN EN ISO 14043      DIN EN ISO 14043 Umweltmanagement – Ökobilanz – Auswertung, Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth-Verlag; Berlin 1997ff
- [83] Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung      Verkehr in Zahlen 2002/2003, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Sabine Radke, 31. Jg., erw. Ausg., Deutscher Verkehrs-Verlag, ISBN 3-87154-279-2; Berlin 1998
- [84] Donnerstag, A., Korb, K.      Realisierungsmöglichkeiten eines Sub-ULEV-Konzepts - Anforderungen an die Abgasreinigung, HdT-Paper, Haus der Technik e.V., 12.11.1996; Essen 1996
- [85] Düsterwald, H.-G.      Energiewandlungsketten für den Straßenverkehr: Vergleich von limitierten und klimarelevanten Emissionen, Diplomarbeit, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Studiengang Maschinenbau, Fachrichtung Wärmetechnik, 5. April 1994; Aachen 1994
- [86] Ecotraffic AB  
Ekelund      Ekelund, M., The Life of Fuels, Motor Fuels from Source to End Use, An Energy and Emissions Systems Study of Conventional and Future Options, March 1992; Stockholm 1992
- [87] Ecotraffic AB      Environmental and Health Impact from Modern Cars, A comparison between two petrol and two diesel cars with varying emissions control technology, May 2002; Borlänge 2002
- [88] Ekdunge, P., Raberg, M.      "The Fuel Cell Vehicle Analysis of Energy Use, Emissions and Cost", Paper: Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 23, No. 5, International Association for Hydrogen Energy, 381-385
- [89] Ellensohn, R.      Der Dieselantrieb der Zukunft –CO<sub>2</sub>-neutral und schadstofffrei?, Iveco Motorenforschung AG, 8.12.2003; Arbon 2003
- [90] EMPA, Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt      Bach, Ch., Heeb, N., Mattrel, P., Mohr, M., Wirkungsorientierte Bewertung von Automobilabgasen, Forschungsbericht der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Nr. 160928/2; Dübendorf 1998
- [91] Enderle, Ch., Wunderlich, K., Kaufmann, Th.; Keller, U.      „Die elektromagnetische Ventilsteuerung (EVC) als kraftstoffverbrauchsreduzierende Zukunftstechnologie im Spannungsfeld Variabilität, Komplexität und Kosten“, 24. Internationales Wiener Motorensymposium 2003, 15.-16.05.2003; Wien 2003, 31-53
- [92] European Commission      Davison, P., Lewis, C.A., „Part E. Fuel and Energy Production“, MEET, Methodology for calculating transport emissions and energy consumption, March 1999; Brüssel 1999, 327-334

- [93] Fabri, J., Reglitzky, A. A., Voisey, M. „Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Kraftstoffen aus Sicht der Kette, Förderung, Verarbeitung, Verteilung und Endverbrauch“, Vortrag auf der DGMK-Haupttagung, 20./21.9.1990, Münster; Deutsche Shell AG - ISSN 0934-3601; Hamburg 1990
- [94] Ford Motor Co Stockhausen, W.F., Natkin, R.J., Kabat, D.K., Reams, L., Tang, Hashemi, S., Szwabowski, S., J., Zanardelli, V., “Ford P2000 Hydrogen Engine Design and Vehicle Development Program”, SAE-Paper: World Congress & Exhibition, Session: SI Combustion, March 2002; Detroit, Michigan 2002
- [95] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. Höhle, B., Nitsch, J., Wagner, U., Brennstoffzellen-Studie, Ganzheitliche Systemuntersuchung zur Energiewandlung durch Brennstoffzellen, Vorhaben Nr. 686, Abschlußbericht, Heft 657, 1998; Frankfurt 1998
- [96] Forschungszentrum Jülich Grube, T., Höhle, B., Menzer, R., Stolten, D., „Neue Herausforderungen im Straßenverkehr: Brennstoffzellen-Antriebe für Pkw“, Beitrag zur Euroforum-Fachkonferenz „Brennstoffzellen für mobile Anwendungen“, 20.-21. Januar 2000; Stuttgart 2000
- [97] Forschungszentrum Jülich Höhle, B., Biedermann, P., Menzer, R., Stolten, D., „Assessments and Necessary Developments for Fuel-Cell-Powered Vehicles“, IWV 3 - Energy Process Engineering, Workshop: Fuel Cell Policy, 28.-29. June 2000; Berlin 2000
- [98] Forschungszentrum Jülich Biedermann, P., Birnbaum, K.U., Grube, T., Höhle, B., Menzer, R., Walbeck, M., Stolten, D., Hake, J.-F., Systemvergleich: Einsatz von Brennstoffzellen in Straßenfahrzeugen, Studie im Auftrag des TAB, IWV 3, STE – Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energietechnik, Volume 17, ISBN 3-89336-285-1; Jülich 2001
- [99] Friedrich et al. „NECAR 4 – Testing of a Fuel Cell Vehicle“, Paper: Brennstoffzellenfahrzeuge, Haus der Technik Essen, 30.11.-1.12.1999; Essen 1999
- [100] Friedrich, C., Krebs, W., Quarg, J., Kapus, P. „Downsizing – ein geeigneter Ansatz zur Wirkungsgradsteigerung von Ottomotoren?“, 23. Internationales Wiener Motorensymposium 2002, 25.-26.04.2002; Wien 2002, 31-49
- [101] Frischknecht et al. Ökoinventare für Energiesysteme, Grundlagen für den Ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz, ETH Zürich; Zürich 1994
- [102] Friedrich, A. “Climate Gas Emissions and Cost of Bio Fuels Production and Use”, Hart World Fuels Conference Europe 2002, Brussels Sheraton Hotel and Towers, May 21-23, 2002; Brüssel 2002
- [103] Gas Research Institute Darrow, K. G., Light Duty Vehicle Full Fuel Cycle Emissions Analysis, Topical Report, Contract No. 5093-294-2573, Energy International, Inc. Report No. 9333R440, April 1994; Washington D.C., Chicago, IL 1994
- [104] Giegrich, J., Sturm, K. „Naturraumbanspruchung waldbaulicher Aktivitäten als Wirkungskategorie für Ökobilanzen“, Teilbericht zum UBA-Forschungsprojekt „Ökologischer Vergleich graphischer Papiere (FKZ 103 50 120), März 1999; Heidelberg 1999

- [105] Gossen, F.;  
Grahl M. „Vergleich von Brennstoffzellen- und weiterentwickelten zukünftigen Antrieben hinsichtlich Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit“, 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4.-5. Oktober 1999; Aachen 1999
- [106] Goubeau, A.,  
Heuser, R.,  
Metz, N.,  
Nierhauve, B.,  
Sporckmann, B. „Energieverbrauch und Emissionen zukünftiger Pkw-Antriebe, Ein Vergleich für das Jahr 2000“, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 46. Jg. (1996) Heft 12
- [107] Grebe, U.D.,  
Prüfer, R.,  
Hofmann, P.,  
Fitl, M.,  
Weissenberger, D. „Kanalabschaltung: Der intelligente Weg zur Verbrauchsreduzierung kleiner Ottomotoren“, 23. Internationales Wiener Motorensymposium 2002, 25.-26.04.2002; Wien 2002, 81-100
- [108] Guzella, L.,  
Martin, R. Das SAVE-Motorkonzept, MTZ Motortechnische Zeitschrift 10/1998, Jg. 59, 644-650; Wiesbaden 1998
- [109] Hayashi, T. et al. „The Research of Emission Reduction Technologies for ZLEV“, HdT-Paper: Zukünftige Abgasgesetzgebung in Europa und USA, Haus der Technik, 9./10.11.1998; Essen 1998
- [110] Heine, B.,  
Penn-Bressel, G. Vergleich des Flächenbedarfs verschiedener Verkehrsmittel im städtischen Personenverkehr, Umweltbundesamt; Berlin 1995
- [111] Heinrich, D.,  
Tittel, R.G. The Role of Low Friction Lubricants In Reducing Vehicle Emissions, German-American Coalition “Transatlantic Coalition on Cars and Climate”, June, 15<sup>th</sup>, 2001; Washington 2001
- [112] Heitland, et al. „Möglichkeiten und Potentiale neuer Kraftstoffe und Antriebe im Verkehr“, Studienprogramm für die Enquête-Kommission des deutschen 11. Bundestages „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“; Wolfsburg 1989
- [113] Hühlein, B.,  
Biedermann, P. „Vergleichende Analyse von Pkw Antrieben der Zukunft mit Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen-Systemen“, Tagung „Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge“, VDI-Berichte 1378, 17.-18. Februar 1998; Dresden 1998, 171-183
- [114] IEA; International Energy Agency Implementing Agreement 026 “Fuel Cells” – Annex X: Fuel Cell Systems for Transportation (1997-1999), coordinated by Institute for Materials and Processes in Energy Systems, IWV 3 - Energy Process Engineering Paris/Jülich 1997-1999
- [115] IFEU; Institut für Energie und Umweltforschung Reinhardt, G., Heiss, K., Höpfner, U., Knörr, W., Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz von Rapsöl und Rapsölester im Vergleich zu Dieselmotoren, UBA-Forschungsbericht 104 08 508/02,1991; Berlin 1991
- [116] IFEU; Institut für Energie und Umweltforschung Höpfner, U., Patyk, A., Komponenten-Differenzierung der Kohlenwasserstoffemissionen von Kfz, UFOPLAN Nr. 105 06 069, August 1995; Heidelberg 1995
- [117] IFEU; Institut für Energie und Umweltforschung Eden, T.U., Höpfner, U., Patyk, A., Reinhardt, G.A., Zenger, A., „Ökologische Bilanzierung von Elektrofahrzeugen“ aus: Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Dezember 1996; Bonn 1996

- [118] IFEU; Institut für Energie und Umweltforschung Patyk, A., Kraftstoffe auf Erdölbasis, Dokumentation zu Energieeinsatz und Emissionen der Endenergieträgerbereitstellung in TREMOD, Entwurf zur Fachdiskussion mit dem UBA, August 1997; Heidelberg 1997
- [119] IFEU; Institut für Energie und Umweltforschung Höpfner, U., Knörr, W., „Energieverbrauch und Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1980 bis 2020“, VDI-Tagung Bahnen und Umwelt, Bericht Nr. 1499, 23./24.9.1999; München 1999, 69-82
- [120] IFEU; Institut für Energie und Umweltforschung Knörr, W., Fortschreibung Daten und Rechenmodell, Entwurf des Endberichts, im Auftrag des Umweltbundesamtes, UFOPLAN Nr. 298 45 105, 30.11.1999; Heidelberg 1999
- [121] IFEU; Institut für Energie und Umweltforschung Reinhardt, G.A., Borken, J., Patyk, A., Vogt, R., Zemanek, G., Ressourcen- und Emissionsbilanzen: Rapsöl und RME im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff, Gutachten; Heidelberg 1999
- [122] IFEU; Institut für Energie und Umweltforschung Patyk, A., Höpfner, U., Ökologischer Vergleich von Kraftfahrzeugen mit verschiedenen Antriebsenergien unter besonderer Berücksichtigung der Brennstoffzelle, Endbericht im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, November 1999; Heidelberg 1999
- [123] IFEU; Institut für Energie und Umweltforschung Knörr, W., Höpfner, U., Lambrecht, U., Patyk, A., Daten- und Rechenmodell: „Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1980-2020“ und „TREMOD: Transport Emission Estimation Model“ im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin und in Kooperation mit dem VDA, dem MWV, der Deutschen Bahn und anderen Heidelberg, 2000
- [124] IFEU; Institut für Energie und Umweltforschung Knörr, W., Höpfner, U., Lambrecht, U., Patyk, A., Fortschreibung Daten- und Rechenmodell, Entwurf des Endberichtes, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Forschungsprojekt-Nr. 298 45 105, 31.08.2000; Heidelberg, 2000
- [125] IFEU; Institut für Energie und Umweltforschung Höpfner, U., „Emissions- und Immissionsprognosen für den Straßenverkehr in Deutschland – Welche Luftqualitätsziele werden erreicht?“, Technischer Kongress des VDA – IAA 2000, 28.-29.09.2000; Frankfurt, 2000
- [126] IFEU; Institut für Energie und Umweltforschung Pehnt, M., Höpfner, U., Ökobilanzen von Brennstoffzellen-Antrieben in Pkw: ein Überblick, Kurzexpertise im Auftrag des Umweltbundesamtes, April 2002; Heidelberg 2002
- [127] IFEU; Institut für Energie und Umweltforschung Knörr W., Höpfner, U., Lambrecht, U., Kullmer, K., Patyk, A., Weber, G., Aktualisierung des „Daten- und Rechenmodells: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1980-2020“, Endbericht, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Forschungsprojekt-Nr. 201 45 112, 31.10.2002; Heidelberg 2002
- [128] IFEU/ITA, Institut für Energie und Umweltforschung / Institut für Toxikologie und Aerosolforschung Lambrecht, U. et al., Immissionsbezogener Wirkungsvergleich für Kraftfahrzeuge mit Otto- und Diesel-Antrieb; Berlin 2000
- [129] IFEU/VCD, Institut für Energie und Umweltforschung / Verkehrsclub Deutschland Aktualisierung der Bewertungskriterien der VCD-Auto-Umweltliste, eine gutachterliche Stellungnahme des ifeu, VCD (Hrsg.), Mai 1997; Bonn 1997
- [130] IFEU/VCD, Institut für Energie und Umweltforschung / Verkehrsclub Deutschland Höpfner, U., Diaz-Bone, H., Lambrecht, U., In die Stadt mit Pkw, Bus oder Bahn? - Die motorisierten Stadtverkehrsmittel auf dem Umweltprüfstand VCD-Workshop „Umweltstandards im ÖPNV“, 14. Dezember 2000; Frankfurt 2000

- [131] IFEU/VCD, Institut für Energie und Umweltforschung / Verkehrsclub Deutschland  
In die Stadt mit Pkw, Bus oder Bahn?, Die motorisierten Stadtverkehrsmittel auf dem Umweltprüfstand, Studie des ifeu zur Erstellung der Broschüre „Bus, Bahn und Pkw im Umweltvergleich, Der ÖPNV im Wettbewerb“, VCD (Hrsg.), 21.02.2001; Bonn 2001
- [132] IKA, Institut für Kraftfahrwesen  
Bady, R., Renner, C., Wallentowitz, H., Biermann, J.-W., Einsatz von Elektrofahrzeugen, BMV-Forschungsprojekt FE-Nr. 70466/95, Projektnummer 6024, Dezember 1997; Aachen 1997
- [133] IKARUS, Instrumente für Klimagas-Reduktions-Strategien  
Hedden, K., Jess, A., Teilprojekt 4 „Daten: Umwandlungssektor“, Unterbereich „Raffinerien und Ölveredelung“, Entwurf des Endberichtes, Forschungsprojekt für das Bundesministerium für Forschung und Technologie, Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe, Dezember 1992; Karlsruhe 1992
- [134] IKP, Institut für Kunststoffkunde und Kunststoffprüfung; PE Product Engineering; IFEU; Institut für Energie und Umweltforschung  
Gediga, J., Hoffmann, R., Lambrecht, U., Emissionsbilanz Pkw über den gesamten Lebenszyklus, Abschlußbericht und Berechnungsmodell, FKZ 297 45099 im Auftrag des Umweltbundesamtes, 1999; Stuttgart, Dettingen, Heidelberg 1999
- [135] IKP, Institut für Kunststoffkunde und Kunststoffprüfung  
GaBi – Das Softwaresystem zur Ganzheitlichen Bilanzierung, Handbuch GaBi 3, Integriertes Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung, umfassende aktuelle Datenbank, Benutzerführung von der Konzeption bis zur Analyse, Institut für Kunststoffkunde und Kunststoffprüfung, Universität Stuttgart, April 1998; Stuttgart 1998
- [136] INFRAS  
Maibach, M., Peter, D., Seiler, B., Ökoinventar Transporte, Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Transportsystemen in Ökobilanzen, Technischer Schlussbericht, Verlag INFRAS, Dezember 1995; Zürich 1995
- [137] INFRAS  
Keller, M., Koch, P., Heldstab, J., Dähler-Staub, B., de Haan, P., HBEFA, Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 1.2, Januar 1999; Bern 1999
- [138] Ingenieursschule Biel  
Inoffizielle Messung der Abgasprüfstelle der Ingenieursschule Biel, Kontroll-Nr. 401799-6 vom 02.08.1996 aus: Das SmILE-Konzept, Information der GREENPEACE e.V., August 1996; Hamburg/Biel 1996
- [139] IPCC  
Climate change 1995 –The science of climate change, Intergovernmental Panel of Climate Change (Hrsg.), University Press; Cambridge 1996
- [140] Jain, G.  
Untersuchungen am schnelllaufenden, direkteinspritzenden Pkw-Methanolmotor mit Glühzündung, 1. Auflage 1995, Verlag Main, ISBN 3-930911-70-1, 128 Seiten; Aachen 1995
- [141] Jochem, E.  
Die Politik hat ganz schön versagt, Zeit-Gespräch, DIE ZEIT Nr. 19, 4. Mai 2000, 36-37
- [142] Juffernbruch, R. Kolke, R.  
Energieumwandlungsketten für den Verkehr: Vergleich der Energiebilanzen und CO<sub>2</sub>-Emissionen, Diplomarbeit, FH Aachen, Januar 1993; Jülich 1993
- [143] Kallenbach, R. Kind, W. Bickendorf, F. Jünemann, T.  
CARTRONIC Antriebsstrang- und Energiemanagement, Fortschritt-Berichte VDI „Hybridfahrzeuge und Energiemanagement“, Zentrum für Verkehr der Technischen Universität Braunschweig (Hrsg.), Beiträge zum 1. Braunschweiger Symposium, 21. Februar 2002; Braunschweig 2002

- [144] Kaltschmitt, M.  
Reinhardt, G.A. Nachwachsende Energieträger: Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung, Kaltschmitt, M., Reinhardt, G. A. (Hrsg.), Verlag Vieweg; Braunschweig/Wiesbaden 1997
- [145] KBA, Kraftfahrt-Bundesamt Kraftstoffverbrauchs- und Emissions-Typprüfwerte (einschl. Geräusche) von Kraftfahrzeugen mit Allgemeiner Betriebserlaubnis oder EWG-Typgenehmigung, 11. Ausgabe, Fassung: März 2001  
Flensburg 2001
- [146] KBA, Kraftfahrt-Bundesamt Kraftstoffverbrauchs- und Emissions-Typprüfwerte (einschl. Geräusche) von Kraftfahrzeugen mit Allgemeiner Betriebserlaubnis oder EWG-Typgenehmigung, 12. Ausgabe, Fassung: 2002;  
Flensburg 2002
- [147] KFB, Kommunikations  
Forsknings Beredningen -  
The Swedish Transport and  
Communications Research  
Board Carlsson, F., Johansson-Stenman, O., The Costs and Benefits of Electric Vehicles – Should Battery, Hybrid and Fuel-Cell Vehicles Be Publicly Supported in Sweden?, Department Of Economics, Göteborg University, KFB-Report 2000:46, ISBN 91-89511-01-8, September 2000;  
Göteborg 2000
- [148] Kishi, N. et al. "Research of Automobile Emission Reduction Technologies lower than ULEV Vehicles", Global Powertrain Congress 1998 Emissions Testing & Controls, October 6 - 8, 1998;  
Detroit, Michigan 1998
- [149] Körner, W.D.,  
Bergmann, H. Alternativkraftstoffe für Nutzfahrzeuge, Mercedes Benz AG, Geschäftsbereich Nfz Entwicklung;  
Stuttgart 1989
- [150] Kommission der  
Europäischen Gemeinschaf-  
ten Vorschlag für eine Richtlinien des Rates über Altfahrzeuge. KOM(97) 358 endg., 97/0194 (SYN), 09.07.1997;  
Brüssel 1997
- [151] Kommission der  
Europäischen Gemeinschaf-  
ten Mitteilung der Kommission "Die Erdölversorgung der Europäischen Union", Brüssel, 11.10.2000, KOM (2000) 631 endgültig, Kommission der Europäischen Gemeinschaft;  
Brüssel 2001
- [152] Koßmehl, S.-O. Beurteilung der technischen, ökologischen und ökonomischen Bedingungen für den Einsatz von Biokraftstoffen im Kraftfahrzeug, Dissertation, Technische Universität Berlin, FB 10 – Verkehrswesen und angewandte Mechanik, Institut für Straßen- und Schienenverkehr (ISS);  
Berlin 1995
- [153] Kolke, R. „Energie- und Emissionsbilanz fortschrittlicher Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und Batterie-Antrieb“, Internationales Verkehrswesen, 48. Jg. (1996), Heft 12, 16-22
- [154] Kolke, R.,  
Friedrich, A. „Gegenüberstellung von Pkw mit Verbrennungskraftmaschinen, Hybridantrieben und Brennstoffzellen aus Umweltsicht“, VDI-Bericht 1418, Innovative Fahrzeugantriebe;  
Düsseldorf 1998, 9-34
- [155] Krebs, R.,  
Stiebels, B.,  
Sperling, H. „Das Kraftstoffsystem des „Lupo FSI“ von Volkswagen“, aus: Diesel- und Benzin-Direkteinspritzung, Einspritzsysteme – Potenziale, Anwendungen, Zukunftsentwicklungen, Tschöke, H., Leyh, B. und 35 Mitautoren, Haus der Technik, Essen, Steinmetz, E. (Hrsg.), Expert Verlag, Dezember 2000;  
Magdeburg/Essen 2000, 151-173
- [156] Langniß, O.,  
Nitsch, J. „Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung – Ein solares Langfrist-szenario für Deutschland“, FVS-Workshop Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 12. Dezember 1997;  
Freiburg 1997, 7-64
- [157] Länderausschuss für  
Immissionsschutz Krebsrisiko durch Luftverunreinigung – Entwicklung von „Beurteilungsmaßstäben für kanzerogene Luftverunreinigungen“ im Auftrag der Umweltministerkonferenz, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes NRW;  
Düsseldorf 1992

- [158] Leiber, T.;  
Leiber H.,  
„IVC: A new actuator for electromagnetic valve train – Fundamentals of layout, approaches to solve open issues of the electromechanical valve train“, Tagung, Haus der Technik, 19./20. März 2002;  
Essen, 2002
- [159] Leiber, T.,  
Movileanu, G.,  
Saffert, E.  
IVC: A new actuator for the electromechanical valve train with low power consumption, LSP Innovative Automotive Systems GmbH;  
München, 2003
- [160] Löhr, D.  
„Urmonopole, intertemporal soziale Kosten und nachhaltiges Wirtschaften“, Zeitschrift für Sozialökonomie, Folge 113, Juli 1997
- [161] Loske, R.  
Klimapolitik. Im Spannungsfeld von Kurzzeitinteressen und Langzeiterfordernissen; (1996, 2. Auflage 1997) "Ökologie und Wirtschaftsforschung", Band 20, Metropolis-Verlag, ISBN 3-89518-091-2;  
Marburg 1996/1997
- [162] Ludwig Bölkow System-  
technik GmbH  
Heuser, R., Loerbroks, A., Niebauer, P., Schindler, J., Schurig, V., Wurster, R., Fortschrittliche Antriebskonzepte für Stadtbusse und Verteilerfahrzeuge mit niedrigsten Emissionen; Stufe I, Endbericht, gefördert durch Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, TV 9367, Juni 1996;  
Ottobrunn 1996
- [163] Ludwig Bölkow Systemtech-  
nik GmbH  
Zittel, W., Untersuchung zum Kenntnisstand über Methanemissionen beim Export von Erdgas aus Russland nach Deutschland, Studie im Auftrag der Ruhrgas AG, 1997;  
Ottobrunn 1997
- [164] Ludwig Bölkow Systemtech-  
nik GmbH  
Berthold, O., Bünger, U., Niebauer, P., Schindler, J., Schurig, V., Weindorf, W., Analyse von Einsatzmöglichkeiten und Rahmenbedingungen von Brennstoffzellen in Haushalten und im Kleinverbrauch in Deutschland und Berlin, Gutachten im Auftrag von Deutscher Bundestag (TAB), Bewag AG und Gasag AG, 1999;  
Ottobrunn 1999
- [165] Mahle GmbH  
Abele, M., Lechner, M., „Das MAHLE-Leichtbauventil: Verbesserungspotential für moderne Pkw-Motoren“, 23. Internationales Wiener Motorsymposium 2002, 25.-26.04.2002;  
Wien 2002, 67-80
- [166] Marker, F.,  
Jamaly, F.,  
Zycinski, J.  
Emissionsreduzierung von Kraftfahrzeugen durch den Einsatz von Hybridantrieben, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 103 (2001), Heft 1, 58-62;  
Wiesbaden 2001
- [167] Methanex  
<http://www.methanex.com/methanol/currentprice.htm> (Stand: Mai 2002)
- [168] MIT, Massachusetts Institute  
of Technology  
Weiss, M. A., Heywood, J. B., Drake, E. M., Schafer, A., AuYeung, F. F., On the Road in 2020, A life-cycle analysis of new automobile technologies, energy Laboratory report MIT EL 00-003, October 2000;  
Cambridge, Massachusetts, 2000
- [169] Morfeld, P.,  
Lampert, K.,  
Ziegler, H.,  
Stegmaier, C.,  
Dhom, G.,  
Piekarski, C.  
„Längsschnittstudie zum Einfluß der Bergarbeiterpneumokoniose auf die Lungenkrebsmortalität von unter Tage tätigen Bergleuten im Deutschen Steinkohlebergbau“, aus: Psychomentale Belastungen und Beanspruchungen im Wandel von Arbeitswelt und Umwelt. Kanzerogenese und Synkanzerogenese; Dokumentationsband über die 37. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V., Borsch-Galetke E., Struwe F. (Hrsg.), Rindt-Druck Fulda;  
Wiesbaden 12.-15.05.1997, 133-137
- [170] National Renewable Energy  
Laboratory  
Kelly, K. J., Bailey, B. K., Coburn, T. C., Clark, W., Eudy, L., Lissiuk, P., "FTP Emissions Test Results form Flexible-Fuel Methanol Dodge Spirits and Ford Econoline Vans", SAE-Paper, International Spring Fules and Lubricants Meeting, May 6-8, 1996;  
Dearborn, Michigan 1996

- [171] National Research Council      Review of the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles: Third Report, Standing Committee to Review the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles, National Research Council, National Academy Press, ISBN 0-309-05776-0; Washington D.C. 1997
- [172] National Research Council      Review of the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles: Fourth Report, Standing Committee to Review the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles, National Research Council, National Academy Press, ISBN 0-309-06087-7; Washington D.C. 1998
- [173] National Research Council      Review of the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles: Fifth Report, Standing Committee to Review the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles, National Research Council, National Academy Press, ISBN 0-309-06443-0; Washington D.C. 1999
- [174] National Research Council      Review of the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles: Sixth Report, Standing Committee to Review the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles, Board on Energy and Environmental Systems, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, ISBN 0-309-07094-5; Washington D.C. 2000
- [175] National Research Council      Review of the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles: Seventh Report, Standing Committee to Review the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles, Board on Energy and Environmental Systems, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, ISBN 0-309-07603-X; Washington D.C. 2001
- [176] Nissan Motor Co., Ltd.            Nishizawa, K., Momoshima, S., Koga, M., Kachi, N., „Entwicklung eines neuen Benzinmotors mit schadstofffreien Emissionen als Ziel“, 21. Internationales Wiener Motorensymposium 2000, 04.-05.05.2001; Wien 2000, 113-126
- [177] Nitsch, J.                              Probleme der Langfristkostenschätzung, Vortrag beim Workshop: "Energiesparen - Klimaschutz der sich rechnet", DLR Stuttgart, FhG-ISI und DIW Berlin im Auftrag des Umweltbundesamtes, 8.-9.10.1998; Rotenburg an der Fulda 1998
- [178] Northeast Advanced Vehicle Consortium      Bradley, M.A. et al., Future Wheels, Interview with 44 Global Experts On the Future of Fuel Cells for Transportation And Fuel Cell Infrastructure and A Fuel Cell Primer., Agreement No. NAVC1099-PG030044, November 1, 2000; Boston, 2000
- [179] Ogden, J.,  
Kreutz, T.G.,  
Steinbugler, M.                          Fuels for Fuel Cell Vehicles: Vehicle Design and Infrastructure Issues, SAE Paper 982500, International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exposition, October 19-22, 1998; San Francisco, California
- [180] Ogden, J.,  
Williams, R.H.,  
Larson, E.D.,                              Toward a Hydrogen based Transportation System, Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University, 8 May 2001; Princeton, New Jersey, 2001
- [181] Öko-Institut                            Fritsche, U. et al., Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 2.0 Endbericht, Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten (Hrsg.), Januar 1993; Darmstadt 1993
- [182] Öko-Institut                            Fritsche, U. et al., Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 2.1 Erweiterter Endbericht, Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten (Hrsg.), Mai 1995; Darmstadt 1995

- [183] Öko-Institut  
Matthes, C., CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten, Konzept, Potentiale und Grenzen eines Instruments für politische Entscheidungen, Endbericht im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie, Berlin, Dezember 1998;  
Berlin 1998
- [184] Öko-Institut  
Fritsche, U. et al., Erarbeitung von Basisdaten zum Energieaufwand und der Umweltbelastung von energieintensiven Produkten und Dienstleistungen für Ökobilanzen und Produkte unter Berücksichtigung des kumulierten Energieaufwandes, Informations- und Datenbanksystems, 1999;  
<http://www.oeko.de/service/kea/>  
Darmstadt 1999
- [185] Öko-Institut  
Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.05 , Juni 2001;  
Darmstadt 2001
- [186] Organisation for Economic Co-Operation and Development  
Environmentally Sustainable Transport, Report on Phase II of the OECD EST Project;  
ENV/EPOC/PPC/T(97)1/Final; Paris 1999
- [187] Patyk, A., Reinhardt, G.  
Düngemittel – Energie- und Stoffstrombilanzen, Patyk, A., Reinhardt, G. A. (Hrsg.), Verlag Vieweg;  
Braunschweig/Wiesbaden 1997
- [188] Patyk, A.  
Energiebereitstellung von Otto-, Dieselkraftstoff und Strom, Arbeitspapier für [122], Entwurfsfassung 24.03.1999;  
Heidelberg 1999
- [189] Patyk, A.  
Energiebereitstellung von Bioenergieträgern (Rapsölmethylester, Ethanol), Arbeitspapier für [122], Entwurfsfassung 24.03.1999;  
Heidelberg 1999
- [190] Patyk, A.  
„Umweltaspekte des Einsatzes von Brennstoffzellen und ihrer Energieträger“, Tagung: Brennstoffzellen - effiziente Energietechnik der Zukunft, 20./21. Juli 2000;  
Friedrichshafen 2000, 41-50
- [191] Patyk, A.  
Sachbilanz Mineralöl im Bereich Raffinerieverarbeitung und Verteilung, DGMK-Forschungsbericht 549, DGMK, Deutsche wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.;  
Hamburg 2001
- [192] Pehnt, M.  
„Ökobilanz von Methanol aus Holz und Erdgas“, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 49. Jg. (1999) Heft 4;  
1999, 246-252
- [193] Pehnt, M.  
Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 6, Energietechnik, Nr. 476, ISBN 3-18-347606-1, VDI-Verlag 2002;  
Düsseldorf 2002
- [194] Petermann, T.  
„25 Jahre Technikfolgenabschätzung – ein Jubiläum besonderer Art“, TA-Datenbank-Nachrichten, Nr. 3/4, November 1998;  
Karlsruhe 1998, 4-5
- [195] Pierburg AG  
Reuter, W., Blank, H., Klotzbach, P., Sari, O., „Innovative AGR-Systeme für direkteinspritzende Otto-Motoren“, Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 1999, 4.-6. Oktober 1999;  
Aachen 1999, 793-814
- [196] Poten and Partners  
LNG in World Markets, A Monthly Report on Commercial and Technical Developments, June 2001, Volume 13, Number 7
- [197] PROGNOSE AG  
Schulz, J., Eland, M., Reeg, M., Meyer, C., Zukünftige Antriebe von Straßenfahrzeugen, Markt, Technologie und Umweltverträglichkeit von herkömmlichen und alternativen Antriebskonzepten für Straßenfahrzeuge bis zum Jahr 2010, Endbericht, Proj.-Nr. 601/3698, April 1992;  
Basel 1992

- [198] Pott, E. „Verbrauchs-, Emissions- und Heizkomfortoptimierung bei DI-Dieselfahrzeugen durch Energieflussmanagement“, Paper: Innovative Fahrzeugantriebe, VDI-Berichte 1418, 269-284
- [199] PROGNOSE AG Prognos: Trendsckizze; Bonn 1998
- [200] Rat von Sachverständigen für Umweltfragen Umweltgutachten 1994: Für eine dauerhaft umweltgerechte Entwicklung, 1994. 380 S./pp., ISBN 3-8246-0366-7, Metzler-Poeschel, Februar 1994 Stuttgart 1994
- [201] Rat von Sachverständigen für Umweltfragen Umweltgutachten 2000: Schritte ins nächste Jahrtausend Kurzfassung, 2000. ca. 900 S./pp., ISBN 3-8246-0620-8, Metzler-Poeschel, April 2000; Stuttgart 2000
- [202] Robert Bosch GmbH Küssel, M., Moser, W., Philipp, „Motronic MED7 für Benzin-Direkteinspritzung: Systemstruktur und Diagnose“, Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 1999, 4.-6. Oktober 1999; Aachen 1999, 831-851
- [203] Rösgen, H.-J., et al. Das Erdgasbusprojekt Berlin, Technischer Abschlußbericht, Gefördert durch die Europäische Kommission im Rahmen des THERMIE Programms (GD XVII), Vertrags-Nr. TR 519/94DE/BE, November 1997; Berlin 1997
- [204] Rodt, S. „Ist eine Grenzwertstufe EURO 5 für Pkw notwendig?“, Tagung Schadstoffminderung bei Kraftfahrzeugen nach 2005, Haus der Technik, 29./30. Januar 2002; Essen, 2002
- [205] Ruhr Universität Bochum Folkers, C., Brocks, F., Abschlußbericht zum Gutachten zur ökonomischen Bewertung von Rapsöl/Rapsölmethylester (RME) gegenüber Dieselkraftstoff, Lehrstuhl für Finanzwissenschaft an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaft, FKZ 363 01 017, September 1999; Bochum 1999
- [206] Salber, W., Kemper, H., van der Staay, F., Esch, T., Der elektromechanische Ventiltrieb – Systembaustein für zukünftige Antriebskonzepte, Teil 1, MTZ Motortechnische Zeitschrift 12/2000, Jg. 61, 827-836; Wiesbaden 2000
- [207] Säverin, R., Bräunlich, A., Enderlein, G., Heuchert, G. Kohortenstudie zum Einfluss von Dieselmotoremissionen auf die Lungenkrebsterblichkeit im Kalibergbau, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Fachbereich Arbeitsmedizin, Abteilung Epidemiologie; Schlussbericht, Berlin Dezember 1997
- [208] Schaefer, H. „Zur Definition des kumulierten Energieaufwandes (KEA) und seiner primärenergetischen Bewertung“ Paper: Kumulierte Energie- und Stoffbilanzen – Ihre Bedeutung für Ökobilanzen, VDI-Berichte 1093, 11-25
- [209] Scharmer, K., Golbs, G. Biodiesel, Energie- und Umweltbilanz Rapsölmethylester, GET - Gesellschaft für Entwicklungstechnologien mbH im Auftrag der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. (UFOP); Jülich 1997
- [210] Schmidt, H. Ermittlung gesetzlich limitierter Schadstoffe von Diesel-Pkw über die Lebensdauer (Feldüberwachung Diesel Pkw II), Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, RWTÜV Institut für Fahrzeugtechnik, FKZ-Nr. 200 42 101, 6.3.2002; Essen/Berlin 2002
- [211] Schmidt, H. Ermittlung gesetzlich limitierter Schadstoffe von Fahrzeugen im Verkehr während der Lebensdauer und Ermittlung von Emissionsfaktoren (Feldüberwachung G-Kat III), Abschlußbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, RWTÜV Institut für Fahrzeugtechnik, FKZ-Nr. 298 45 118, 6.3.2002; Essen/Berlin 2002

- [212] Schmidt, H. Ermittlung gesetzlich limitierter Schadstoffe von Fahrzeugen im Verkehr während der Lebensdauer auf Grundlage der gesetzlichen Vorgaben und Ermittlung von Emissionsfaktoren (Feldüberwachung G-Kat IV), Abschlußbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, RWTÜV Institut für Fahrzeugtechnik, FKZ-Nr. 200 45 144, Frühjahr 2002; Essen/Berlin 2002
- [213] Schmidt, H. Determination of pollutants limited by law emitted by vehicles in traffic (In-Use Compliance Testing), Sub-Report „Volkswagen Lupo TDI, 1191 cm<sup>3</sup>, 45 kW (3-Liter Lupo) driven with bio-diesel“, March 2002; Essen 2002
- [214] Schmied, M. Energieverbrauch und Emissionen verschiedener Verkehrsmittel im Personenverkehr auf der Relation Berlin – Bonn, Diplomarbeit, Fachgebiet Energie- und Rohstoffwirtschaft, Fachbereich Wirtschaft und Management, TU Berlin, Juni 1997; Berlin 1997
- [215] Schuckert, M. Ganzheitliche Bilanzierung – vom Bauteil zum System am Beispiel von Verkehrsträgern, Dissertation, Fakultät Verfahrenstechnik, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde der Universität Stuttgart, 1996; Stuttgart 1996
- [216] Schülers, A.,  
Abel, A.,  
Fickel, H.C.,  
Preis, M.,  
Artmann, R. Der Zwölfzylinder-Wasserstoffmotor im BMW 750hL, MTZ Motor-technische Zeitschrift, 2/2002, Jg. 63, 98-105; Wiesbaden 2001
- [217] Senat für Stadtentwicklung  
und Umweltschutz Berlin Studie zur ökologischen und stadtverträglichen Belastbarkeit der Berliner Innenstadt durch den Kfz-Verkehr; Berlin 1993
- [218] Shell International Shell Oil Company, Alternative Fuels, The relative Economics of Environmental Friendly Fuels, Paper: "Transportation and the Environment in the 21st Century", St. Gregory Hotel, 19. April 2001; London 2001
- [219] Spier, B.,  
Gutmann, G.,  
Walter, M. „Elektrochemische Energiespeicher für neuen Bordnetze“, Paper: Innovative Fahrzeugantriebe, VDI-Berichte 1418, 285-294
- [220] Sporckmann, B. „Elektrofahrzeuge als Luftschadstoffbremse“, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 6/1990
- [221] Statistisches Bundesamt Hahlen, J., Statement von Präsident Johann Hahlen, Pressekonferenz Umweltökonomische Gesamtrechnung 1999“, 29. September 1999; Wiesbaden 1999
- [222] Statoil R&D Centre Hansen, R., Olsvik, O., Norwegian methanol plant outlines operations, expansion plans, Oil & Gas Journal, February 7, 2000, 46-52
- [223] Stelzer, T. Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen –Lebensweganalysen von Umweltwirkungen, Forschungsbericht, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Band 57, ISSN 0938-1228, Mai 1999; Stuttgart 1999
- [224] Stern, R. Bewertung des Beitrags von Produkten zur Photooxidantienbildung im Rahmen von Ökobilanzen auf der Basis photochemischer Modellrechnungen, Methodenpapier zur Ökobilanz „Graphische Papiere“ [256], UFOPLAN Nr. 103 50 120; Berlin 1997
- [225] Strogies, M. persönliche Mitteilungen an das ifeu [122], Umweltbundesamt; Berlin 1999
- [226] TAB, Büro für Technik-  
folgenabschätzung beim  
Deutschen Bundestag TAB – Ziele, Themen, Organisation, TAB – Goals, Topics, Organization, Broschüre, Januar 2000; Berlin 2000

- [227] TNO Automotive Gense, N.J.L., Vermeulen, R.J., N<sub>2</sub>O formation in vehicle catalysts, TNO-Report 02.OR.VM.017.1/NG, 28.02.2002; Delft 2002
- [228] TNO Automotive Rijkeboer, R.C., Gense, N.J.L., Vermeulen, R.J., Options to integrate the use of mobile air-conditioning systems and/or auxiliary heaters into the emission type approval test and the fuel consumption test for passenger cars, Draft final report for the European Commission, DG-ENV, 30.09.2002; Delft, 2002
- [229] Toyota Motor Corporation Fujimura, T., Matsushita, S., Tanaka, T., Kojima, K., Entwicklung in Richtung Serienproduktion eines Diesel-Pkw für Europa in einem System für gleichzeitige NO<sub>x</sub> und Partikelreduktion, 23. Internationales Wiener Motorensymposium 2002, 26.-26.04.2002; Wien 2002
- [230] Toyota Motor Corporation Sasaki, S., Kobayashi, N., Hashimoto, Y., Tanaka, T., Hirota, S., Neues Verbrennungsverfahren für ein "Clean Diesel System" mit dpnr, MTZ Motortechnische Zeitschrift 11/2002, Jg. 63, 948-954; Wiesbaden 2002
- [231] Tschöke, H. „Rapsöl als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren – Chancen oder Irrweg?“, Fuels – 1<sup>st</sup> International Colloquium, Technische Akademie Esslingen, 16-17. Jan. 1997; Esslingen 1997
- [232] Tschöke, H., Schulze, L., Braungarten, G. Motoruntersuchungen mit Abgasnachbehandlungssystemen zum Forschungsprojekt „Abgasnachbehandlung bei RME-Betrieb“, Teil des Gemeinschaftsprojektes: „Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu Rapsmethylester“ gefördert durch Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V. (UFOP), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Volkswagen AG Wolfsburg, Ölmühle Leer Connemann GmbH & Co., u.a., Abschlußbericht, Otto-von-Guericke-Universität, Institut für Maschinenmesstechnik und Kolbenmaschinen, Magdeburg, 28.02.2002; Magdeburg 2002
- [233] ULSAB-AVC, UltraLight Steel AutoBody - Advanced Vehicle Concept Advanced Vehicle Concepts, Safe, affordable, fuel efficient vehicle concepts for the 21<sup>st</sup> century designed in steel, Overview Report, January, 2002; Middletown, Ohio 2002
- [234] Umweltbundesamt Blümel, H., CO<sub>2</sub>- und Schadstoffausstoß durch den Betrieb von Batterie-, Hybrid- und Verbrennungsmotor-Pkw im Vergleich, Methodik, Emissionen, Immissionen, September 1991; Berlin 1991
- [235] Umweltbundesamt Ökologische Bilanz von Rapsöl bzw. Rapsölmethylester (Ökobilanz Rapsöl), Texte 4/93; Berlin 1993
- [236] Umweltbundesamt Kolke, R., Elektro-Otto-Diesel-Pkw Systemvergleich, unveröffentlichte Studie, 20.01.1995; Berlin 1995
- [237] Umweltbundesamt Rodt, S., Friedrich, A., Jost, D., Kolke, R., Niederle, W., Rudolf, W., Tappe, M., Passenger Cars 2000, Requirements, Technical Feasibility and Costs of Exhaust Emission Standards for the Year 2000 in the European Community, UBA-Texte 61/95, April/June 1995; Berlin 1995
- [238] Umweltbundesamt Klöpffer, W., Renner, I., Giegrich, J., Mampel, U., Duscha, M., Zazczyk, R., Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen, UBA Texte 23/95, Juli 1995; Berlin 1995

- [239] Umweltbundesamt Schmitz, s., Oels, H.-J., Tiedemann, A., et al., Ökobilanz für Getränkeverpackungen, UBA-Texte 52/95, August 1995; Berlin 1995
- [240] Umweltbundesamt Nachhaltiges Deutschland, Wege zu einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung, Erich Schmidt Verlag; Berlin 1997
- [241] Umweltbundesamt Maßnahmenplan Umwelt und Verkehr, Ein Konzept für eine nachhaltig umweltverträgliche Verkehrsentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland, 18.12.1997; Berlin 1997
- [242] Umweltbundesamt Erneute Überprüfung eines Konzeptes mit motornahem Katalysator und unter Verwendung von Leichtlauföl (B-88), Messungen des RWTÜV im November 1998, 02.12.1998; Berlin 1998
- [243] Umweltbundesamt Mangelsdorf, I., Aufderheide, M., Boehncke, A., Melber, C., Rosner, G., Höpfner, U., Borken, J., Patyk, A., Pott, F., Roller, M., Schneider, K., Voß, J.-U., Durchführung eines Risikovergleiches zwischen Dieselmotoremissionen und Ottomotoremissionen hinsichtlich ihrer kanzerogenen und nicht-kanzerogenen Wirkung, UBA-Bericht 2/99, März 1999, ISBN 3-503-04862-6; Berlin 1999
- [244] Umweltbundesamt Kolke, R., Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen, Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, UBA-Texte 33/99, Mai 1999; Berlin 1999
- [245] Umweltbundesamt Ziele für die Umweltqualität, Eine Bestandsaufnahme; Entwurf, Juli 1999; Berlin 1999
- [246] Umweltbundesamt Fritsche, U., Hochfeld, C., Jenseits, W., Rausch, L., Lützkendorf, T., Eiermann, O., Kohler, N., Ziesing, H.-J., Patel, M., KEA: Mehr als eine Zahl, Basisdaten und Methoden zum kumulierten Energieaufwand (KEA), Broschüre, Arbeitspapiere und Daten-CD-Rom erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes, August 1999; Berlin 1999
- [247] Umweltbundesamt Schmidt, M., Frings, E., Verkehr im Umweltmanagement, Anleitung zur Betrieblichen Erfassung verkehrsbedingter Umweltwirkungen, Ein Leitfaden erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin, September 1999; Berlin 1999
- [248] Umweltbundesamt Aubel, T., Gebhard, K., Reithmaier, Ermittlung von Geräusch- und Rollwiderstandsbeiwerten von Pkw-Reifen, UBA-Texte 72/99, Oktober 1999; Berlin 1999
- [249] Umweltbundesamt Lambrecht, U., Höpfner, U., Borken J., Voß, J.-U., Boehncke, A., Mangelsdorf, I., Heinrich, U., Schneider, K., Roller, M., Immissionsnaher Risikovergleich von Diesel- und Ottoabgasen, Auswirkung zukünftiger Grenzwerte auf die Luftqualität und die Gesundheit, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, November 1999; Berlin 1999
- [250] Umweltbundesamt Kraus, K., Niklas, G., Tappe, M., Aktuelle Bewertung des Einsatzes von Rapsöl/RME im Vergleich zu Dieseldieselkraftstoff, UBA-Texte 79/99, Dezember 1999; Berlin 1999
- [251] Umweltbundesamt Schmitz, S., Paulini, I. und Arbeitskreis Bewertung in Ökobilanzen, Bewertung in Ökobilanzen, Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043, Version '99, UBA-Texte 92/99, Dezember 1999; Berlin 1999

- [252] Umweltbundesamt Kolke, R., Technical Options for Abating Road Traffic Impacts, Comparative study of fuel cell vehicles and vehicles with internal combustion engines, UBA-Texte 93/99, Dezember 1999; Berlin 1999
- [253] Umweltbundesamt Hintergrundinformation: Sommersmog, Pressestelle des Umweltbundesamtes, Mai 2000  
Berlin 2000
- [254] Umweltbundesamt Daten zur Umwelt 2000/2001, Erich Schmidt Verlag  
Berlin 2000
- [255] Umweltbundesamt Tiedemann, A., et al., Ökobilanz für graphische Papiere, Vergleich von Verwertungs- und Beseitigungsverfahren für graphische Altpapiere sowie Produktvergleiche für Zeitungsdruck-, Zeitschriften- und Kopierpapiere unter Umweltgesichtspunkten, UBA-Texte 22/00, August 2000; Berlin 2000
- [256] Umweltbundesamt Plinke, E., Schonert, M., Meckel, H., Detzel, A., Giegrich, J., Fehrenbach, H., Ostermayer, Ax., Schorb, A., Heinisch, J., Luxenhofer, K., Schmitz, S., Ökobilanz für Getränkeverpackungen II, Hauptteil, UBA-Texte 37/00, September 2000; Berlin 2000
- [257] Umweltbundesamt Bracher, T., Bergmann, M., Diegmann, V., Uricher, A., Becker, U., Eckart, C. F., Karl, B., Karl, G., Liwicki, M., Lobenberg, G., Lüers, A., Völlings, A., Wetzel, C., Bewertungs- und Berechnungsverfahren zur Flächenbeanspruchung, Umweltentlastung durch Kostenminimierung im Verkehr: Least Cost Planning im Verkehr, Schlussbericht Teil 3, UBA-Texte 41/00; Berlin 2000
- [258] Umweltbundesamt CO<sub>2</sub>-Minderung durch umweltorientiertes Flottenmanagement, Workshop, Umweltbundesamt, 8.-9. März 2001; Berlin 2001
- [259] Umweltbundesamt Jahresbericht 2000, Umweltbundesamt (Hrsg.), 21. Juni 2001; Berlin 2001
- [260] Umweltbundesamt Kurzbericht Ozonsituation 2001 in der Bundesrepublik Deutschland, Umweltbundesamt, November 2001; Berlin 2001
- [261] Umweltbundesamt Nachhaltige Entwicklung in Deutschland, Die Zukunft dauerhaft umweltgerecht gestalten, Erich Schmidt Verlag; Berlin 2002
- [262] Umweltbundesamt Forschungsprojekt zur Fortschreibung der EU-Richtlinie zur Verbrauchs- und CO<sub>2</sub>-Messung bei Pkw und Erfassung verbrauchsintensiver Nebenaggregate, UFOPLAN 2002; Forschungskennzahl 201 45 105, in Bearbeitung durch RWTÜV Fahrzeug GmbH; Berlin 2002
- [263] Umweltbundesamt Rodt, S., Future Diesel, Abgasgesetzgebung Pkw, leichte Nfz und Lkw – Fortschreibung der Grenzwerte bei Dieselfahrzeugen, Umweltbundesamt, Juli 2003; Berlin 2003
- [264] Umweltministerkonferenz Anforderungsprofile für ökologisch vertretbare Automobile, Bericht der Arbeitsgruppe "Umwelt und Verkehr" der Umweltministerkonferenz, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Dezember 1998; München 1998
- [265] Universität Dortmund Finke, L., Kieslich, W., Neumeyer, H.-P., Stand und Weiterentwicklung von Umweltqualitätszielen, Umwelthandlungszielen und Umweltindikatoren der Raum- und Siedlungsentwicklung, UBA-Texte 45/00; Berlin 2000

- [266] U.S. Department of Energy Moorer, R., "Energy Security for Energy Security for America's Transportation", Freedom Car, 2002 CleanEnergy Seminar, March 20, 2002;  
Sacramento, CA 20002
- [267] Valentin, B. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Wasserstoffinfrastruktur für Kraftfahrzeuge, Diplomarbeit, FH München, Linde Gas AG, 08.11.2001;  
München 2001
- [268] VDI, Verein deutscher Ingenieure VDI Richtlinie 4600, Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden, VDI-Gesellschaft Energietechnik, 1997-06;  
Düsseldorf 1997
- [269] VDI, Verein deutscher Ingenieure VDI Richtlinie 4600, Kumulierter Energieaufwand – Beispiele, VDI-Gesellschaft Energietechnik, 1998-06;  
Düsseldorf 1998
- [270] Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie eine gemeinsame Initiative der Unternehmen BMW Group, DaimlerChrysler, MAN, Volkswagen, Shell, Aral, RWE mit der Regierung der Bundesrepublik Deutschland, Statusbericht der Task-Force an das Steering-Committee, Dezember 1999;  
Berlin 1999
- [271] Verron, H.,  
Gorißen, N.,  
Kolke, R.,  
Pastowski, A.,  
Petersen, R. OECD Project on Environmentally Sustainable Transport (EST), Phase 2, German Case Study, Revised Version, Umweltbundesamt/Wuppertal Institute, March 1999;  
Berlin/Wuppertal 1999
- [272] Verron, H.,  
Gorißen, N.,  
Jäcker-Cüppers, M.,  
Klippel, P.,  
Kolke, R.,  
Rothengatter, W.,  
Schade, B.,  
Schade, W. OECD Project on Environmentally Sustainable Transport (EST), Phase 3, German Case Study, Final Draft, Umweltbundesamt/Institute for Economic Policy Research, University of Karlsruhe, TH, January 2000;  
Berlin/Karlsruhe 2000
- [273] Vester, F. „Systemanalyse, Teilmodell Individualfahrzeug“, Ausfahrt Zukunft, Strategien für den Verkehr von morgen. Eine Systemuntersuchung, Wilhelm Heyne Verlag  
München 1991, 121-146
- [274] Völtz, M. Leichtlauf durch Schmierstoffe, Ursachen und Wirkung, „CO<sub>2</sub>-Minderung durch umweltorientiertes Flottenmanagement“, Workshop, Umweltbundesamt, 8.-9. März 2001;  
Berlin 2001
- [275] Volkswagen AG Lies, K.-H., Schulze, J., Winneke, H., Kuhler, M., Kraft, J., Hartung, A., Postlka, A., Gring, H., Schröter, D., Nicht limitierte Automobil-Abgas-komponenten, Schrift der Volkswagen AG, August 1988;  
Wolfsburg 1988
- [276] Volkswagen AG Weidmann, K., Anwendung von Rapsöl in Fahrzeug-Dieselmotoren, Sonderdruck, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 97 (1995), Heft 5;  
Wolfsburg 1995
- [277] Volkswagen AG;  
IKP, Institut für Kunststoffkunde und Kunststoffprüfung Schweimer, G.W., Schuckert, M., Sachbilanz eines Golf, VW-Forschungsbericht Nr. K-EFVT 9604 V/5, korrigierte und ergänzte Fassung nach „Ganzheitliche Betrachtung im Automobilbau: Rohstoffe – Produktion – Nutzung – Verwertung“, VDI-Bericht 1307, VDI Tagung 27.-29. November 1996;  
Wolfsburg 1996

- [278] Volkswagen AG Quissek, F., Fahrzeugantriebe der Zukunft - Aus Sicht der VW-Forschung, ÖMV-Tagung Wien, Veröffentlichungen des Bereichs Forschung, Umwelt und Verkehr in Fachzeitschriften sowie Vorträge zu ausgewählten Themen bei nationalen und internationalen Fachtagungen, 14.1.1997; Wolfsburg 1997
- [279] Volkswagen AG Kohoutek, P., Beyersdorf, J., Eggeling, M., Hartung, A., Nagel, C., Schulze, J., „Status der nicht limitierten Abgaskomponenten von Volkswagen“, 19. Internationales Wiener Motorensymposium 1998, 7.-8.05.1998; Wien 1998
- [280] Volkswagen AG Schweimer, G.W., Sachbilanz des 3 Liter Lupo, VW-Forschungsbericht; Wolfsburg 1999
- [281] Volkswagen AG Schindler, K.-P., „Future Vehicle Technologies“, Health Effects of Emissions, The Royal Society of Medicine, London, 23-24 February 2000; London 2000
- [282] Volkswagen AG Glück, K.-H., Göbel, U., Hahn, H., Höhne, J., Krebs, R., Kreuzer, T., Pott, E., Die Abgasreinigung der FSI-Motoren von Volkswagen, MTZ Motortechnische Zeitschrift 6/2000, Jg. 61, 402-412; Wiesbaden 2000
- [283] Volkswagen AG Steiger, W., König, A., Schumacher, V., Heinrich, H., „Die Volkswagen Strategie zum hocheffizienten Antrieb“, 22. Internationales Wiener Motorensymposium 2001, 26.-27.04.2001; Wien 2001
- [284] Volkswagen AG Dorenkamp, R., Döriges, U., Hunkert, S., „Beiträge zur Erfüllung der Euro 4-Grenzwerte bei Pkw-Dieselmotoren“, Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2001, 8.-10. Oktober 2001; Aachen 2001, 721-736
- [285] Volkswagen AG Technische Daten für unterschiedliche Fahrzeugtypen, u.a.: <http://www.volkswagen.de/polo/daten/motoren/40kw.htm>
- [286] Volkswagen AG Wiedmann, M., Friese, M., Ganzer, M., Wittig, F.-M., „Das Super-ULEV-Konzept des Volkswagen Konzerns für den nordamerikanischen Markt“, 23. Internationales Wiener Motorensymposium 2002, 26.-26.04.2002; Wien 2002
- [287] Wagner, H.J., Voss, A. Beitrag der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE) am Forschungszentrum Jülich, Studienprogramm für die Enquête-Kommission des 11. Deutschen Bundestages „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“; Jülich 1990
- [288] Wang, M. Q. The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation (GREET 1.5a) Model, Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, 21.04.2001; Argonne, Illinois 2001
- [289] Wein, K., Blümel, H. „Kosteneffizienz alternativer Pkw-Antriebe, Beispiel Elektrostraßenfahrzeug“, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 46. Jg. (1996) Heft 3
- [290] Weinbrenner, P. Die Technologiefolgeschätzung, Beschreibung der Grundkonzeption, Lehrstuhl für Didaktik der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, 15.07.1998; <http://www.wiwi.uni-bielefeld.de/~weinbren/technikf.htm> Bielefeld 1998
- [291] Weizsäcker, von, E.U. Wider den Sozialdarwinismus, Ökologisch-evolutionäre Reflexionen, 28. Deutscher Evangelischer Kirchentag, 16.-20. Juni 1999; Stuttgart 1999
- [292] Wengel, J., Schirrmeister, E. Auswirkungen des Innovationsprozesses auf die baden-württembergische Industrie; Abschlußbericht zum Verbundforschungsprojekt „Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle – Chancen und Risiken für die baden-württembergische Industrie“; Karlsruhe, Februar 2000, 177-201

- [293] WHO, World Health Organization  
Guidelines for Community noise;  
Rom 1999
- [294] Wichmann, H.E.,  
Brüske-Hohlfeld, I.,  
Möhner, M.,  
Kreienbock, L.,  
Kreuzer M.,  
Jöckel, K.H.,  
Ahrens, W.,  
Pohlablen, H.,  
Bolm-Audorff, U.  
Lungenkrebsrisiko durch berufliche Exposition – gemeinsame Auswertung zweier epidemiologischer Fall-Kontroll-Studien hinsichtlich beruflicher Belastungsfaktoren;  
Ausführliche Zusammenfassung vom 03.11.1997
- [295] Woll, A.  
Wirtschaftslexikon, 9., Artur Woll (Hrsg.), überarbeitete und erweiterte Auflage 2000, Oldenbourg Verlag, ISBN 3-486-25060-4
- [296] World Commission on Environment and Development  
Welt im Wandel: Wege zur Lösung globaler Umweltprobleme, Unsere gemeinsame Zukunft, Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung, Springer-Verlag;  
Berlin 1987
- [297] Year 2000 Battery Technology Advisory Panel  
Anderman, M., Kalhammer, F.R., MacArthur, D., Advanced Batteries for Electric Vehicles: An Assessment of Performance, Cost, and Availability, prepared for State of California Air Resources Board, June 22, 2000; Sacramento, CA 2000
- [298] ZAE, Zentrum für angewandte Energieforschung e.V.; IfE, Institut für Energiewirtschaft  
Bauer, H., Hoffmann, C., Ilmberger, F., Brunner, T., Ebersperger, R., Fleißner, T., Kawollek, R., Kumulierter Energieaufwand und energieoptimierte Nutzungsdauer von Personenkraftwagen, ZAE-Projekt 94-250.031 im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Verkehr; April 1995; München 1995

## 6.2 Verwendete Symbole

### *Einheiten*

bbl	Barrel	Volumen	$158,988 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
d	Tag	Zeit	$86,4 \cdot 10^3 \text{ s}$
g	Gramm	Masse	$10^{-3} \text{ kg}$
h	Stunde	Zeit	$3,6 \cdot 10^3 \text{ s}$
J	Joule	Energie	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$
K	Kelvin	Temperatur	-
l	Liter	Volumen	$10^{-3} \text{ m}^3$
m	Meter	Länge	-
mile	Meile	Länge	1609 m
mol	Mol	Stoffmenge	-
s	Sekunde	Zeit	-
t	Tonne	Masse	$10^3 \text{ kg}$
t SKE	Steinkohleeinheit	Energie	29,3076 GJ
W	Watt	Leistung	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3$
Wh	Wattstunde	Energie	$3,6 \cdot 10^3 \text{ J}$

### *Griechische Symbole*

$\Sigma$	Summe
$\emptyset$	Durchschnitt
$\lambda$	Luftverhältnis

## 6.3 Abkürzungen

1G	Einganggetriebe	CGH <sub>2</sub>	Compressed Gaseous Hydrogen, komprimierter Wasserstoff
5G M	Manuelles Fünfganggetriebe	CH <sub>4</sub>	Methan
6G A	Automatisiertes Sechsganggetriebe	CITAIR	Computer Instrument For the Assessment of Effects of Local Transport Policy Measures, Computer Instrument zur Überprüfung der Wirkungen kommunaler verkehrspolitischer Maßnahmen
A	Querschnittsfläche	CML	Centrum voor Milieukunde
AB	Autobahn	CNG	compressed natural gas, komprimiertes Erdgas
AB <sub>jährlich</sub>	jährlicher Abschreibungsbetrag bei linearer Abschreibung	CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
ABS	Auszahlungen für Brennstoffkosten	CO <sub>2</sub> absolut	absolute direkte Kohlendioxidemission
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil Club	CO <sub>2</sub> spezifisch	spezifische Kohlendioxidemission
ACEA	Association des Constructeurs Européens d' Automobiles, Europäischer Verband der Automobilhersteller	CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf, Maß für den Eintrag organischen Kohlenstoffs
AI <sub>gesamt</sub>	Anfangsinvestition/Herstellungskosten	c <sub>w</sub>	Luftwiderstandsbeiwert
AI	Auszahlungen für Investitionen/Herstellungskosten	D	Deutschland / Diesel (z.B. EURO 4D)
AO	Außerorts	D3	Pkw-Abgasstandard der deutschen Steuergesetzgebung auf Grundlage von EURO 3 und 91/441/EWG
AP	Acidification Potential, Säurebildungspotential	D4	Pkw-Abgasstandard der deutschen Steuergesetzgebung auf Grundlage von EURO 4 und 91/441/EWG
AS	Auszahlungen für sonstige Betriebskosten	D <sub>i</sub>	Durchlassfähigkeit der Infrastruktur für die Verkehrsart i
ATL	Abgasturbolader, Aufladung	DE-Z	Dezentrale Herstellung
B	Benzin (z.B. EURO 4B)	DGMK	Deutsche wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.
B <sub>e</sub>	streckenbezogener Treibstoffverbrauch	DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
B' <sub>e</sub>	heizwertbezogener Verbrauch	DME	Dimethylether
b <sub>erf</sub>	erforderliche mittlere Breite eines Verkehrsträgers	DM-BZ /	Direkt-Methanol-Brennstoffzelle /
B	Beurteilungswert	DMFC	Direct-Methanol Fuel Cell
Bio	Stoff/Energieträger aus biogenen Einsatzstoffen	DS	Doppelter Schaden
BaP	Benz[a]pyren	e <sup>-</sup>	Elektron
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen	EC	elementarer Kohlenstoff, Anteil am Gesamtpartikel
BImSchV	Bundes Immissionsschutz Verordnung	EGI	Exhaust-Gas-Ignition, Abgaszündung
BImSchG	Bundes Immissionsschutz Gesetz	EK	Erlöse aus der Abgabe von in der Referenzvariante nicht berücksichtigten Koppelprodukten
BK	Braunkohle	Elyse	Elektrolyse
BMBF	Bundesministeriums für Bildung, Forschung und Technologie	EMVT	Elektromechanischer variabler Ventiltrieb
BP	British Petrol	EPA	Environmental Protection Agency
BTX	Benzol, Toluol, Xylol	ES	Einfacher Schaden
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern	ESF	Elektrostraßenfahrzeug
BW	Barwert	ET	Energieträger
CARB	California Air Resources Board	EtOH	Ethanol
C <sub>c</sub>	Kohlenstoffkonzentration		
C <sub>s</sub>	Schwefelkonzentration		
CF	Charakterisierungsfaktor einer Wirkungskategorie bezüglich eines Stoffes		

EU	Europäische Union	IVU	Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
EURO 1 bis 5	Europäische Abgasstandard für Kfz	k.A.	Keine Angabe
EVU	Energieversorgungsunternehmen	Kalif.	Kalifornien
$f_r$	Rollwiderstandsbeiwert	KEA	Kumulierter Energie Aufwand
FCKW	fluorierte Chlor-Kohlenwasserstoffe	KEA <sub>erneuerbar</sub>	Kumulierter erneuerbarer Energie Aufwand
FI	Intensität der Flächennutzung	KEA <sub>nicht-erneuerbar</sub>	Kumulierter nicht-erneuerbarer Energie Aufwand
FI <sub>t</sub>	zeitbewertete Intensität der Flächennutzung	Kfz	Kraftfahrzeug
FKW	perfluorierte Kohlenwasserstoffe, Fluor Chlor Kohlenwasserstoffe	KV	Kleinverbraucher
FormA	Formaldehyd	KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
FOSSIL	Nicht-erneuerbare Energieträger	LAI	Länderausschuss für Immissionsschutz
FTP 75	Federal Test Procedure, U.S. Amerikanischer Fahrzyklus	LCA	Life Cycle Assessment, Ökobilanz
Fz	Fahrzeug	LH <sub>2</sub>	liquefied hydrogen, Flüssigwasserstoff
GaBi	Softwaresystem zur Ganzheitlichen Bilanzierung	Li/Ion	Lithium/Ionen Batterie
GEMIS	Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme Datenbank	Lkw	Lastkraftwagen
G-Kat	Geregelter Katalysator	LL-	Leichtlauf-
GK, GK <sub>statisch</sub>	Gesamtkosten über die Lebensdauer nach statischer Investitionskostenrechnung	LNfZ	leichtes Nutzfahrzeug
GREET	Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation Model, Modell für Treibhausgase, limitierte Emissionen und Energieverbrauch im Verkehr	LNG	liquefied natural gas, Flüssigerdgas
GUS	Gemeinschaft unabhängiger Staaten	LPG	Liquefied Petroleum Gas, Flüssiggas
GWP	Global Warming Potential, Treibhauspotential	M	Stoffstrom eines Stoffes
H	Wasserstoffatom	$M_c$	relative Atommasse von Kohlenstoff
H <sub>2</sub>	Wasserstoffmolekül, Wasserstoffgas	$M_{CO_2}$	relative Atommasse von Kohlendioxid
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren [137]	$M_s$	relative Atommasse von Schwefel
HC	Hydrocarbon, Kohlenwasserstoffe	$M_{SO_2}$	relative Atommasse von Schwefeldioxid
HCl	Chlorwasserstoff	MeOH	Methanol
HF	Fluorwasserstoff	MMC	Metal Matrix Composite, Metall Matrix Verbundstruktur
HFKW	wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe	MS	Microsoft
HH	Haushalt	N <sub>2</sub> O	Distickstoffoxid, Lachgas
H <sub>u</sub>	spezifischer Heizwert (früher „unterer Heizwert“)	Na/NiCl <sub>2</sub>	Natrium/Nickelchlorid Batterie
HYZEM	EU-Projekt HYZEM: Hybrid Technology approaching efficient Zero Emission Mobility	NCAP	New Car Assessment Programme
hv	Kurzwellige Lichtenergie	NCPOCP	Nitrogen Corrected Photochemical Ozone Creation Potential, NO <sub>x</sub> korrigiertes POCP
i.d.R.	In der Regel	NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
IE	Indikatorergebnis	Nfz	Nutzfahrzeug
ifeu	Institut für Energie und Umweltforschung, Heidelberg	NG	natural gas, Erdgas
IKARUS	Instrumente für Klimagas-Reduktions-Strategien	NG-CGH <sub>2</sub>	Erdgasreformierung und Komprimierung von Wasserstoff
IO	Innerorts	NG-LH <sub>2</sub>	Erdgasreformierung und Verflüssigung von Wasserstoff
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change	NH <sub>3</sub>	Ammoniak
ISO	International Standardisation Organisation	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ammonium
ITA	Fraunhofer Institut für Toxikologie & Aerosolforschung, Hannover	Ni/Cd	Nickel/Cadmium Batterie
		Ni/MH	Nickel/Metallhydrid Batterie
		NMHC	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe
		NO	Stickstoffmonoxid
		NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
		NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide
		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrat
		NP	Nitrification Potential, Eutrophierungspotential
		NRW	Nordrhein Westfalen
		O	Sauerstoffatom
		O <sub>2</sub>	Sauerstoffmolekül, Sauerstoffgas
		O <sub>3</sub>	Ozon

ODP	Ozone Depletion Potential, Ozonabbaupotential	SRU	Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, Wiesbaden
OK	Ortsklasse	StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
OK I	lokal-städtische Gebiete mit hoher Bevölkerungsdichte	SULEV	Super Ultra Low Emission Vehicle
OK II	regional-ländliche Gebiete mit mittlerer bis niedriger Bevölkerungsdichte	SULEV + NO <sub>x</sub>	SULEV; Ausnahme: NO <sub>x</sub> -Wert
OK III	überregional-globale Gebiete mit sehr niedriger oder ohne Bevölkerungsdichte	T	Temperatur
ÖPNV	Öffentlicher Personen Nahverkehr	TAB	Büro für Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages
opt.	optimiert	THC	Total Hydrocarbon, Gesamtkohlenwasserstoffe
OT	Oberer Totpunkt	Tkm	Tonnen-Kilometer
P	Phosphor	TREMOD	Traffic Emission Estimation Model, Modell zur Berechnung der Verkehrsemissionen
P-Hybrid	Parallelhybrid Antrieb	u	Untersuchungszeitraum
Pb-Gel	Blei-Gel Batterie	UBA	Umweltbundesamt
Pers	Person	UHZ	Umwelthandlungsziel
PAH	polycyclic aromatic hydrocarbons; polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	ULEV	Ultra Low Emission Vehicle
PEM-BZ	Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle	UMK	Umweltministerkonferenz
PF	Partikelfilter	UQZ	Umweltqualitätsziel
Pkm	Personen-Kilometer	UT	Unterer Totpunkt
Pkw	Personenkraftwagen	UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
PM	Partikel, Particulate Matter	UW	Umweltwirkung
PM <sub>2,5</sub>	siehe Begriffsbestimmungen	VANOS	Variable Nockenwellensteuerung
PM <sub>10</sub>	siehe Begriffsbestimmungen	V <sub>hub</sub>	Hubvolumen
PNGV	Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles, Forschungsprogramm zur (Entwicklungs-) Partnerschaft für eine neue Generation von Kraftfahrzeugen	v <sub>i</sub>	mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsträgers i
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Phosphat	VK	Vermeidungskosten
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential, Photooxidantien Potential	VK <sub>dynamisch</sub>	Vermeidungskosten unter Berücksichtigung der dynamischen Investitionsrechnung
POX	Partial Oxidation, Partielle Oxidation	VK <sup>UW</sup> <sub>abdiskontiert dynamisch</sub>	Vermeidungskosten unter Berücksichtigung der dynamischen Investitionsrechnung und einer Abdiskontierung der Umweltwirkung auf ein Basisjahr
PROX	Preferential Oxidation, selektive Oxidation	VK <sub>statisch</sub>	Vermeidungskosten unter Berücksichtigung der statischen Investitionsrechnung
PV	Photovoltaik	VKM	Verbrennungskraftmaschine
R	Molekülrest eines Kohlenwasserstoffes	VVT	Variable Valve Timing, variable Ventilsteuerung
R <sup>2</sup>	Determinationskoeffizient, Bestimmtheitsmaß	WHO	World Health Organization
-R-	Reformer	z	Kalkulationszinssatz
R-O-CH <sub>3</sub>	Ether	ZENT	zentrale Herstellung
Ref., Referenz	Referenz	ZEV	Zero Emission Vehicle, Nullemissionsfahrzeug
REG	erneuerbare (regenerative) Energieträger	% v/v	Volumenprozent
RFD	Reformulierter Diesel (US Qualität)	% m/m	Massenprozent
RL	Richtlinie		
RME	Rapsölmethylester		
RTP	Relative toxische Potenz		
S-Hybrid	Serieller Hybridantrieb		
s	mittlere Wegelänge		
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexafluorid		
SK	Steinkohle		
SNFZ	Schweres Nutzfahrzeuge		
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid		
sonst.	sonstige		

## 6.4 Begriffsbestimmungen

Abzinsung	Verfahren zur Bestimmung des Gegenwartswertes eines bestimmten Endkapitals.
Adiabat	Zustandsänderung idealer Gase ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung.
Abstand zum Ziel	Kriterium zur Beurteilung von →Wirkungskategorien; beschreibt den Abstand des gegenwärtigen Umweltzustandes in dieser Wirkungskategorie vom angestrebten Umweltziel.
Amortisation	Planmäßige Rückzahlung einer Verbindlichkeit neben der Zinszahlung (→Annuität).
Annuität	Jährliche Tilgungs- und Zinszahlung für eine Kapitalschuld.
Annuitätenfaktor	Der Annuitätenfaktor gibt aus der Sicht eines Kreditschuldners an, welcher gleichbleibende Betrag während der $i$ Jahre Kreditlaufzeit jeweils zum Jahresende zu zahlen ist, um innerhalb dieser Zeit ein Kapital in Höhe von 1 € (einschl. Zinsen und Zinseszinsen) zu tilgen.
Äquivalenzfaktor	Ein Faktor, der aus einem Modell abgeleitet wird, das für die Umwandlung der zugeordneten →Sachbilanzergebnisse in die gemeinsame Einheit des →Wirkungsindikators angewendet wird.
Aufzinsung	Berechnung des Endwertes für ein Anfangskapital bei einer konstanten Verzinsung in Höhe des Zinsflusses über den gesamten Zeitraum. Die Zinsen werden am Ende jeder Periode gutgeschrieben.
Barwert	Der Barwert ergibt sich durch die Rückrechnung von zeitlich auftretenden Zahlungen auf einen Gegenwartswert und unter Berücksichtigung eines festen jährlichen Zinssatzes. Der Barwert gibt damit den auf die Gegenwart bezogenen Wert eines künftigen Ertrages.
Bestimmtheitsmaß	→Determinationskoeffizient
Box Modell	In Box Modellen wird die Atmosphärenchemie eines einzelnen Punktes modelliert. Der Vorteil dieser Modelle liegt darin, dass man sehr komplizierte chemische Reaktionen integrieren kann, da nur die Chemie eines einzelnen Punktes betrachtet wird (→Trajektorienmodell).
Brennstoffzelle	→Polymer-Elektrolyt Brennstoffzelle
Crackverfahren	In der Raffinerie angewendeten Techniken, mit denen größere und schwerere Kohlenwasserstoffmoleküle in kleinere und leichtere gespalten werden. Man unterscheidet im wesentlichen folgende Verfahren: (1.) Thermisches Cracken (hohe Temperaturen und hoher Druck), (2.) Katalytisches Cracken (Katalysator, niedrige Temperatur), (3.) →Hydrocracken (Katalysator, Wasserstoffatmosphäre) und (4.) Steamcracken (Dampf).
Determinationskoeffizient	Der Determinationskoeffizient $R^2$ drückt den Anteil der →gemeinsamen Varianz an der Gesamtvarianz aus. $R^2$ wird auch Bestimmtheitsmaß genannt, weil er angibt, in welchem Ausmaß die Varianz der einen Variablen ( $y=f(x)$ ) durch die Varianz der anderen Variablen ( $x$ ) bestimmt wird.
Direkt-Methanol-Brennstoffzelle	Die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle unterscheidet sich von der →Polymer-Elektrolyt Brennstoffzelle dadurch, dass der Brennstoff Methanol direkt und ohne zwischengeschalteten Reformier an der Anode umgesetzt wird. Dazu wird entweder reines Methanol oder ein Methanol-/Wasser-Gemisch eingeleitet, das sich an der Anode gemäß der Gleichung: $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ umsetzt
Diskontierung	→ Abzinsung
Doppelter Schaden	Konzepte mit höheren Umweltbelastungen und höheren Kosten im Vergleich zur Referenz
Downsizing	Unter (Motor-) Downsizing versteht man in der Regel die Steigerung der spezifischen Motorleistung durch Aufladung zur Verkleinerung von Hubraum, Motorbauvolumen und –gewicht. Eine Reduktion der Zylinderzahl wird so ermöglicht. Das wesentliche Ziel dieser Maßnahmen liegt in einer Verlagerung des Betriebskennfeldes zu höheren Lasten und günstigerem spezifischen Verbrauch. Grundsätzlich ist auch eine gewichtsbezogene Anpassung der Fahrzeugkarosserie (Pkw-Downsizing) vorzunehmen.

Drall	Bei der Strömung im Zylinder von Motoren unterscheidet man als Ladungsbewegung zwischen Drall und $\rightarrow$ Tumble. Es handelt sich um Drehbewegungen um eine Achse, die mehr oder weniger mit der Zylinderachse zusammenfällt. Wegen der geometrischen Randbedingungen bleibt der Drall während des Kolbenhubes erhalten. Die Drehgeschwindigkeit der Ladung kann mit der Brennraumform sogar verstärkt werden
Durchlassfähigkeit	Maß für die Leistungsfähigkeit einer Fahr-, Gehwegspur oder Gleises ohne Beeinträchtigung durch den Verkehr der Gegenrichtung. Sie charakterisiert einen Verkehrsablauf, der bereits mit einigen qualitativen Mängeln behaftet ist, aber immer noch einen stabilen Verkehrsfluss gewährleistet. Für öffentlichen Verkehrsmittel: 5-Minuten-Takt bei einer Auslastung von 90%, Einfachhaltestellen. Für die Pkw: Fahrstreifenbreite 3,25 m, Spurbelegung knapp 100%, Besetzungsgrad 1,3 Personen/Fz. Für den nicht-motorisierten Verkehr: 500 Fahrrädern oder Fußgängern pro Stunde. Berechnungen dieser Arbeit beziehen sich auf eine durchschnittliche Fahrtweite von 10 km.
Einfacher Schaden	Konzepte mit höheren Umweltbelastungen und geringeren Kosten zur Referenz.
Elementarer Kohlenstoff	Beschreibung des unlöslichen Feststoffanteils auf dem Sammelfilter. Er ist mit organischen Lösemitteln nicht löslich, in einer inerten Atmosphäre bis 650°C stabil und wird in der coulometrischen oder thermographischen Analyse ermittelt. Diese Bezugsgröße wird in § 40.2 BImSchG als Bezugsgröße für die Kanzerogenität von Dieselpartikeln aufgeführt.
Emissionen	Alle von Anlagen, Kraftfahrzeugen, Produkten, Stoffen oder sonstigen Quellen ausgehenden (feste, gasförmige, flüssige oder geruchsverbreitende) Stoffe, Wellen- oder Teilchenstrahlungen.
Externe Kosten	Durch Wirtschaftsaktivitäten entstehende Kosten, die nicht vom Verursacher, sondern von der Allgemeinheit getragen werden müssen.
Extrapolation	Im Gegensatz zur $\rightarrow$ Interpolation wird der Verlauf einer Funktion außerhalb des durch Stützwerte (Messergebnisse) abgedeckten Bereichs weiter berechnet. Dies führt i.d.R. zu großen Abweichungen von der Realität und ist daher zu vermeiden.
Feinstaub	Partikelförmige Luftverunreinigungen mit einem aerodynamischen Durchmesser von unter 10 $\mu\text{m}$ (z.B. Ruß, $\rightarrow\text{PM}_{2,5}$ , $\rightarrow\text{PM}_{10}$ ).
Funktionale Einheit	Sie ist die Bezugsgröße für die Ergebnisse einer $\rightarrow$ Sachbilanz (z.B. km, Fahrzeug-km, Tkm, kWh, produzierte Einheit)
Homologation	Zulassungs- und Zertifizierungsprozess für Kraftfahrzeuge bei Typgenehmigungsbehörden.
Humantoxizität	Schädigungen des Menschen über die Atmung und die Nahrungskette.
Hydrocracken	Katalytisches Spaltverfahren (engl. $\rightarrow$ Crackverfahren) in Gegenwart von Wasserstoff und mit einem Druck von etwa 100 bar. Aus Vakuumgasöl wird durch Zerschneiden großer Moleküle des Vakuumgasöls in kleinere Moleküle vorwiegend Benzin oder Mitteldestillat erzeugt. Vakuumgasöl wird mit Wasserstoff vermischt, erhitzt und durch einen mit einem Festbettkatalysator versehenen Reaktor geschickt. Danach gelangen die Kohlenwasserstoffe in den Abscheider, wo der überflüssige Wasserstoff abgetrieben und in den Kreislauf zurückgeführt wird, während das übrige Erzeugnis im Destillationsturm aufgeteilt wird.
Immissionen	Einwirkung von Luftverunreinigungen (Luftimmissionen), Geräuschen (Lärm- oder Geräuschimmissionen), Erschütterungen (Erschütterungsimmissionen) und Wärme (Wärmeimmissionen) auf die Umwelt.
Interpolation	Die Ermittlung eines unbekanntes Funktionswertes zu einem Argument, das zwischen zwei Argumenten mit bekannten Funktionswerten (Stützwerten) liegt. Mittels Interpolationsverfahren wird versucht, einen Attributwert an einer Stelle vorherzusagen, an der dieser Wert nicht gemessen wurde.
Isobar	Zustandsänderung idealer Gase bei konstantem Druck.
Isochor	Zustandsänderung idealer Gase bei konstantem Volumen. Die zugeführt Wärmeenergie wandelt sich restlos in mechanisch Arbeit.
Isotherm	Zustandsänderung idealer Gase bei konstanter Temperatur. Die zugeführt Wärmeenergie wandelt sich restlos in mechanisch Arbeit.
IVU-Richtlinie	Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung gemäß Richtlinie 96/61/EG des Rates vom 24. September 1996.
Kohlendioxid	Treibhausgas in der Atmosphäre, dessen Anteil derzeit 370 ppm beträgt. Pflanzen wandeln Kohlendioxid mit Hilfe von Licht und Wasser zu Kohlenhydraten um.

Kohlenmonoxid	Geruchloses Gas, entsteht bei unvollständiger Verbrennung von Brennstoffen. Eingeatmetes Kohlenmonoxid in höheren Konzentrationen blockiert die Sauerstoffaufnahme des Blutes.
Kohlenwasserstoffe	Aus Kohlenstoff und Wasserstoff gebildete organische Verbindungen. Sie entstehen u.a. bei unvollständiger Verbrennung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe.
Korrelation	Allgemeine Bezeichnung für den stochastischen Zusammenhang zwischen zwei oder mehreren Zufallsgrößen. Der Korrelationskoeffizient gibt den Grad der Abhängigkeit an.
Kumulierter Energieaufwand	Aggregation aller Primärenergieträger auf dem Lebensweg eines Bilanzierungsobjektes von der Hersteller über die Nutzung bis zur Entsorgung.
Kvaerner-Prozess	(→Plasma)bogenprozess, bei dem Kohlenwasserstoffe bei ca. 1600°C in Ruß und Wasserstoff getrennt werden. Durch die Gutschrift des Nebenproduktes Ruß verringern sich der energetische Aufwand und die CO <sub>2</sub> -Emissionen für die Wasserstoffherstellung (Einsatzstoffe: 1000 Nm <sup>3</sup> /h Erdgas, 2100 kW Strom; Produkt: 500 kg/h Ruß, 2000 Nm <sup>3</sup> /h H <sub>2</sub> , 1000 kW Dampf).
Normierung	→spezifischer Wirkungsbeitrag
Ökobilanz	Ganzheitliches Verfahren zur Erfassung und Bewertung von Umweltwirkungen.
Ökologische Gefährdung	Kriterium, mit dem →Wirkungskategorien danach beurteilt werden, für wie schwerwiegend die mit ihnen verbundenen Schäden auf die ökologischen Schutzgüter einzuschätzen sind.
Ökologische Priorität, allgemeine	Durchschnittliche Zusammenfassung der Ergebnisse der → Ökologischen Gefährdung, des Abstandes zum Ziel, und des →spezifischen Wirkungsbeitrages
Ökotoxizität	Schädigung von terrestrischen und aquatischen Ökosystemen.
Ortsklassen	Charakterisierung der Orte der →Emissionen und der Wirkung (Emission oder Immission) nach Gebiete mit hoher, mittlerer und niedriger Bevölkerungsdichte (OK I, II, III).
Partikel	Partikel sind seit Einführung von Grenzwerten 1972 in den USA durch die Meßmethode definiert. Nach dem von der U.S. EPA und der EU-Richtlinie 88/77/EWG vorgegebenen Messverfahren sind Partikel jene festen und flüssigen Abgasbestandteile, die bei einer definierten Maximaltemperatur von 51,7°C aus dem mit gefilterter Umgebungsluft verdünnten Abgas auf einem definierten Probenfilter abgeschieden werden können.
Personenkilometer	Maß für die Beförderungsleistung im Personenverkehr.
Photochemische Oxidantienbildung	→Wirkungskategorie zur Beschreibung der Bildung von photochemischen Oxidantien, durch die Ozon als Sekundäremission von Kohlenwasserstoffen und Stickstoffoxiden entsteht (Sommersmog). →Wirkungsindikator sind NO <sub>x</sub> -korrigierte Ethen-Äquivalente (NCPOCP).
Plasma	Gas, das sich aus Ionen, Elektronen, Radikalen sowie Molekülen und Atomen in unterschiedlichen Anregungszuständen zusammensetzt. Ist die Elektronentemperatur etwa gleich der Temperatur der Neutralteilchen, so liegt ein Hochtemperatur- oder Gleichgewichtsplasma (Lichtbogen, Plasmabrenner) vor. Plasmen leiten den elektrischen Strom, weisen einen hohen Gehalt an Ladungsträgern auf (zwischen 10 <sup>9</sup> und 10 <sup>15</sup> cm <sup>-3</sup> ) und emittieren elektromagnetische Wellen.
PM <sub>2,5</sub>	Partikel, die einen gröbselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 2,5 µm einen Abscheidegrad von mindestens 50% aufweist.
PM <sub>10</sub>	Partikel, die einen gröbselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 µm einen Abscheidegrad von mindestens 50% aufweist.
Polymer-Elektrolyt Brennstoffzelle	Brennstoffzellen wandeln elektrochemisch Energie in elektrische Energie und Wärme. Die eigentliche Zelle besteht aus der Anode, einem Elektrolyt und der Kathode. Anode und Kathode dienen als Katalysator. Bei der PEM ist der Elektrolyt eine Protonenleitende Polymer-Elektrolyt-Feststoff-Membrane aus sulfoniertem Polymer. Die mittlere Schicht besteht aus einer Trägerstruktur, die den Elektrolyten in sich aufnimmt. Empfindlich reagieren PEM Brennstoffzellen auf Kohlenmonoxid (CO). Diese Gas kann den Anodenkatalysator blockieren, was zu einem Leistungsabfall führt.
Priorität	Kriterium zur Rangbildung von →Wirkungsindikator-Ergebnissen; setzt sich aus den Kriterien →Ökologische Gefährdung, → Abstand zum Ziel und →Spezifischer Wirkungsbeitrag zusammen.
Recycling	Die in einem Produktionsprozess erfolgte Wiederaufarbeitung der Abfallmaterialien für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke, jedoch mit Ausnahme der Verwendung als Brennstoff oder zur sonstigen Energiegewinnung.

Rentabilität	Kennzahl zur Ertragslage eines Unternehmens, bei der der Jahresüberschuss auf das durchschnittliche Eigenkapital bezogen wird.
Ruß	Ruß umfasst alle primären partikelförmigen, kohlenstoffhaltigen Produkte eines unvollständigen Verbrennungsprozesses (elementarer Kohlenstoff und organische Verbindungen).
Sachbilanz	Bestandteil der →Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktsystems im Verlauf seines Lebenswegs umfasst.
Sommersmog	→Photochemische Oxidantienbildung
Spezifischer Heizwert	Quotient aus der bei vollständiger und vollkommener Verbrennung einer Masse (in kg) beziehungsweise Stoffmenge (in mol) eines Brennstoffes frei werdenden Wärmemenge und seiner Masse beziehungsweise Stoffmenge. Der Brennwert (früher „oberer Heizwert“) ist der theoretisch größtmögliche Wert; von ihm unterscheidet sich der spezifische Heizwert (früher „unterer Heizwert“) nur durch die Verdampfungswärme.
Spezifischer Wirkungsbeitrag	Aus der →Normierung hergeleitetes Kriterium zur Beschreibung der absoluten Größe von →Wirkungsindikator-Ergebnissen.
Staub	Als Staub werden feinkörnige oder feinfaserige Teilchen einer festen Substanz bezeichnet, die abgelagert sind oder sich in einem Gas oder einer Flüssigkeit im Schwebезustand befinden. Der weitaus größere in der natürlichen Umwelt vorhandene Teil entsteht durch künstliche Quellen wie Feuerstätten und Industrieanlagen beim Zerkleinern, Mahlen und Umfüllen (→Feinstaub).
Stickstoffoxide	Sammelbezeichnung für Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid. Sie entstehen als ungewollte Nebenprodukte bei Verbrennungsprozessen mit hohen Temperaturen (thermisches NO <sub>x</sub> ).
Tonnenkilometer	Maß für die Beförderungsleistung im Güterverkehr, bestehend aus dem Produkt von Zuladung und zurückgelegter Strecke.
Toxizität	Maß für die gesundheitsschädigende Wirkung einer chemischen Substanz oder einer physikalischen Einwirkung.
Trajektorienmodell	Im wesentlichen ist ein Trajektorienmodell (engl. Flugbahn) ein „sich bewegendes Box Modell“ zur Ermittlung chemischer Abläufe in der Atmosphäre. Die Trajektorie eines Punkts berechnet man mittels bekannter Windfelder. Die Chemie bestimmt man dann für alle Punkte entlang des Weges, die das Luftpaket verfolgt hat.
Trendszenario	Szenario, das die Fortschreibung der heutigen Situation in die Zukunft (Trend-Extrapolation) beinhaltet.
Tumble	Bei der Strömung im Zylinder von Motoren unterscheidet man zwischen den Ladungsbewegungen →Drall und Tumble. Beim Tumble steht die Achse der Drehbewegung im rechten Winkel zur Zylinderachse. Wegen der geometrischen Randbedingungen wird der Tumble als Ladungsbewegung zwischen Kolben und Zylinderkopfboden quasi zerquetscht und löst sich in komplexe Strömungsstrukturen und schließlich Turbulenz auf.
Unit Risk	Dosis-Wirkung Beziehung, bei denen unter definierten Randbedingungen und unter Berücksichtigung einer definierten Dosis bei konstanter Exposition und unter Berücksichtigung eines definierten Zeitraumes eine kanzerogene Wirkung eintritt.
Umwelthandlungsziel	Beschreibung der notwendigen Verringerung der Umweltbeanspruchungen, in der Regel um ein →Umweltqualitätsziel zu erreichen.
Umweltqualitätsziel	Beschreibung eines angestrebten Umweltzustandes.
Umweltwirkung	Quantifizierbare Umweltbelastung in einer der in den Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.10 beschriebenen →Wirkungskategorien, bezogen auf eine funktionale Einheit (z.B. je km, je kWh).
Varianz	Die Varianz beschreibt die Verteilung der Merkmalausprägung einer Variablen um den Mittelwert. Sie wird berechnet, indem die Summe der quadrierten Abweichungen aller Messwerte vom arithmetischen Mittel durch die um 1 verminderte Anzahl der Messungen geteilt wird. →Varianz, gemeinsame
Varianz, gemeinsame	Unter gemeinsamer Varianz eines Kriteriums versteht man die gegenseitige Abhängigkeit beider Variablen voneinander, d. h. inwieweit die →Varianz eines Kriteriums die Varianz des anderen Kriteriums bestimmt und umgekehrt. Diese gemeinsame Varianz bezeichnet man als →Determinationskoeffizienten.
Vermeidungskosten	Als Vermeidungskosten wird die Gesamtheit aller Kosten aufgefasst, die mit einer bestimmten Option der Minderung einer Umweltbelastung einhergehen. Die Angabe der Vermeidungskosten bezieht sich in der Regel auf eine spezifische Minderungs-menge.

Versiegelung	Bedeckung des Bodens mit wasserundurchlässigem Material.
Verwertung, energetische	Verwendung von brennbarem Abfall zur Energieerzeugung durch direkte Verbrennung von brennbarem Abfall mit oder ohne Abfall andere Art, aber mit Rückgewinnung der Wärme.
Wiedergewinnungsfaktor	→Annuitätenfaktor
Wirkungskategorie	Klasse wichtiger Umweltthemen, in die die →Sachbilanz-Ergebnisse eingeteilt werden können.
Wirkungsindikator	Quantifizierbare repräsentierende Darstellung einer →Wirkungskategorie.
Zinssatz, Zinsfuß	Prozentsatz, mit dem ein Kapital verzinst wird (Nominalzinssatz). Realzinssatz ist der um die Rate der Geldwertänderung bereinigte Nominalzinssatz.
Zeolith	Ein Zeolith ist eine kristalline Substanz, deren Struktur durch ein Kristallgitter aus miteinander verbundenen Tetraedern, jeder bestehend aus einem Kation und vier Sauerstoff-Atomen, charakterisiert wird. Dieses Kristallgitter enthält offene Hohlräume in Form von Käfigen und Kanälen.

## **7 Anhang**

Tab. 7-1: Stoffwerte von Primärenergieträgern und Kraftstoffen ([14], [93], [112], [122], [152], [181], eigene Berechnungen)

	Druck	Temp.	Aggregat-	S-Gehalt	C-Gehalt	Dichte	Heizwert Hu		SO <sub>2</sub> -Faktor	CO <sub>2</sub> -Faktor
	bar	K	zustand	ppm	% m/m	kg/l	MJ/kg	MJ/l	g <sub>SO2</sub> /MJ	g <sub>CO2</sub> /MJ
Erdöl	1,013	293	flüssig	3,00E+04	85		42,62		1406,31	73,08
Heizöl (leicht)	1,013	293	flüssig	120	85,2		42,84		5,60	72,87
Heizöl (schwer, S-arm)	1,013	293	flüssig	7,00E+03	84		39,64		352,81	77,64
Diesel-DK	1,013	293	flüssig	10	86	0,83	42,5	35,28	0,47	74,14
Diesel-UBA-Wert	1,013	293	flüssig	10	85	0,832	42,5	35,36	0,47	73,62
Benzin-OK	1,013	293	flüssig	10	86	0,74	43,5	32,19	0,46	72,44
Benzin-UBA-Wert	1,013	293	flüssig	10	87	0,746	43,5	32,45	0,46	73,19
Rapsölmethylester RME	1,013	293	flüssig	10	77,1	0,88	37,4	32,91	0,53	75,53
Rapsöl	1,013	293	flüssig	5	77,5	0,92	37,4	34,41	0,27	75,92
DME (Dimethylether)	1,013	293	flüssig	5	52,2	0,66	28,4	18,74	0,35	67,39
Methanol	1,013	293	flüssig	5	38	0,79	19,7	15,56	0,51	70,68
Ethanol	1,013	293	flüssig	25	52	0,79	26,8	21,17	1,86	71,09
Methan	1,013	273	gasförmig	25	75	7,20E-04	50	3,60E-02	1,00	54,96
CNG (Methan)	165	293	gasförmig	25	75	0,13	50	6,47	1,00	54,96
LNG (Methan)	2	111	flüssig	25	75	0,42	50	21	1,00	54,96
Erdgas	1,013	273	gasförmig	25	71,9	8,10E-04	45,21	3,66E-02	1,10	58,28
CNG (Erdgas)	200	293	gasförmig	25	71,9	0,182	45,21	8,23	1,10	58,28
LNG (Erdgas)	2	111	flüssig	25	71,9	0,616	45,21	27,85	1,10	58,28
LPG (Flüssiggas)	5	293	flüssig	5	82	0,503	46	23,15	0,22	65,31
Wasserstoff	1,013	273	gasförmig	0	0	9,00E-05	120	1,08E-02	0,00	0,00
LH <sub>2</sub>	1,013	21	flüssig	0	0	0,0709	120	8,508	0,00	0,00
CGH <sub>2</sub>	300	293	gasförmig	0	0	0,027	120	3,24	0,00	0,00
Steinkohle	1,013	293	fest	1,00E+04	73,9	-	29,31	-	681,65	92,35
Braunkohle, rheinisch	1,013	293	fest	2,50E+03	24,2	-	7,95	-	628,27	111,54
Braunkohle, Niederlausitz	1,013	293	fest	7,00E+03	25,5	-	8	-	1748,17	116,79
Braunkohle, Halle/Lausitz	1,013	293	fest	1,70E+04	26,7	-	9,48	-	3582,74	103,19

Tab. 7-2: Grundlagen zur Ermittlung der spezifischen Beiträge (Energie und Emissionen in Deutschland im Jahr 2010: Pkw-Verkehr und übrige Sektoren inkl. übriger Straßenverkehr) und spezifische Wirkungsbeiträge [122]

	Einheit	Pkw-Verkehr	Übrige Sektoren <sup>1)</sup>	Gesamt	Pkw-Verkehr/Gesamt Quantitativ	Priorität <sup>2)</sup>	
<b>Primärenergie</b>	PJ	1.971	12.259	14.230	13,9%	sehr groß	
<b>Emissionen</b>							
CO <sub>2</sub>	Mt	125	729	854	14,6%	sehr groß	
CH <sub>4</sub>	kt	7,56	2.663	2.670	0,3%	sehr klein	
N <sub>2</sub> O	kt	8,57	148	157	5,5%	groß	
SO <sub>2</sub>	kt	3,52	550	553	0,6%	sehr klein	
NO <sub>x</sub>	kt	131	1.084	1.215	10,8%	sehr groß	
NMHC	kt	61,97	1.092	1.154	5,4%	groß	
Dieselpartikel	kt	3,98	6,23	10,21	39,0%	sehr groß	
NH <sub>3</sub>	kt	6,86	622	628	1,1%	klein	
Benzol	kt	2,76	3,81	6,58	42,0%	sehr groß	
BaP	t	0,024	8,27	8,30	0,3%	sehr klein	
Wirkungskategorie	Wirkungsindikator					spezifischer Wirkungsbeitrag	
1. Ressourcenbeanspruchung	KEA	PJ	1.971	12.259	14.230	13,9%	sehr groß
2. Treibhauseffekt	CO <sub>2</sub> -Äq.	Mt	128	831	958	13,3%	sehr groß
3. Stratos. Ozonabbau	N <sub>2</sub> O	kt	8,57	148	157	5,5%	groß
4.1. Direkte Humantoxizität			k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
5. Direkte Ökotoxizität			k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
6. Photochemische Oxidantienbildung	NCPOCP	kt	63,8	769	837	7,6%	groß
7. Versauerung	SO <sub>2</sub> -Äq.	kt	108	2.477	2.585	4,2%	mittel
8. Eutrophierung	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äq.	kt	19,3	344	363	5,3%	groß
9. Naturraumbeanspruchung (Fläche)	m <sup>2</sup>	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
<sup>1)</sup> Übrige Sektoren: Alle mobilen und stationären Verbraucher und Emittenten incl. Nicht-PKW-Straßenverkehr							
<sup>2)</sup> Prioritäten wegen spezifischer Beiträge und spezifischer Wirkungsbeiträge; Prioritäten: sehr groß, groß, mittel, gering, sehr gering							
Quellen: [122], [123], [199], [225]							

Tab. 7-3a: Zusammenfassung der spezifischen Äquivalenzfaktoren und Beurteilungswerte für unterschiedliche Wirkungsindikatoren

Wirkungskategorie	Wirkungs-indikator	Bezeichnung	Substanz	Äquivalenzfaktor	Einheit	Quellenangabe
1. Ressourcenbeanspruchung	<b>KEA</b>	<b>Kumulierter Energieaufwand</b>		Berechnung nur auf Basis von Datenerhebungen		[246]
2. Treibhauseffekt	<b>CO<sub>2</sub>-Äquivalent</b>	<b>Treibhauspotential</b>		<b>GWP<sub>i</sub></b> Basis: 100 Jahre		[139], [238], [259]
			Kohlendioxid, CO <sub>2</sub>	1	kgCO <sub>2</sub> /kg	
			Distickstoffoxid, N <sub>2</sub> O	310	kgCO <sub>2</sub> /kg	
			Methan, CH <sub>4</sub>	21	kgCO <sub>2</sub> /kg	
			CCl <sub>3</sub> F (FCKW 11)	3.400	kgCO <sub>2</sub> /kg	
			CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> (FCKW 12)	7.100	kgCO <sub>2</sub> /kg	
			C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> F <sub>3</sub> (FCKW 113)	4.500	kgCO <sub>2</sub> /kg	
			CHF <sub>3</sub> (HFKW 23)	11.700	kgCO <sub>2</sub> /kg	
			CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub> (HFKW 134a)	1.300	kgCO <sub>2</sub> /kg	
			C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> F <sub>3</sub> (HFKW 143a)	3.800	kgCO <sub>2</sub> /kg	
			C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> F <sub>2</sub> (HFKW 152a)	140	kgCO <sub>2</sub> /kg	
			CF <sub>4</sub> (Perfluormethan)	6.500	kgCO <sub>2</sub> /kg	
			C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> (Perfluorethan)	9.200	kgCO <sub>2</sub> /kg	
			CCl <sub>4</sub>	1.300	kgCO <sub>2</sub> /kg	
SF <sub>6</sub>	23.900	kgCO <sub>2</sub> /kg				
3. Stratosphärischer Ozonabbau <sup>1)</sup>	<b>FCKW 11-Äquivalent</b>	<b>Ozon Reduktions Potential</b>		<b>ODP<sub>i</sub></b>		[238]
			N <sub>2</sub> O	Gesonderte Bilanzierung als N <sub>2</sub> O		
			CCl <sub>3</sub> F (FCKW 11, Trichlorfluormethan)	1	kg <sub>FCKW11</sub> /kg	
			CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> (FCKW 12)	1	kg <sub>FCKW11</sub> /kg	
			C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> F <sub>3</sub> (FCKW 113)	1,07	kg <sub>FCKW11</sub> /kg	
			C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> (FCKW 114)	0,8	kg <sub>FCKW11</sub> /kg	
			C <sub>2</sub> ClF <sub>5</sub> (FCKW 115)	0,5	kg <sub>FCKW11</sub> /kg	
			CHClF <sub>2</sub> (HFCKW 22)	0,055	kg <sub>FCKW11</sub> /kg	
			CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> (HC 140a)	0,12	kg <sub>FCKW11</sub> /kg	
			CF <sub>3</sub> Br (Halon 1301)	16	kg <sub>FCKW11</sub> /kg	
CF <sub>2</sub> BrCl (Halon 1211)	4	kg <sub>FCKW11</sub> /kg				
CCl <sub>4</sub> (Tetrachlormethan)	1,08	kg <sub>FCKW11</sub> /kg				
4. Direkte Humantoxizität	<b>Relative toxische Potenz</b>	<b>Beurteilungswert</b>		<b>B<sub>i</sub><sup>2)</sup></b>		[243]
			Gesamtpartikel	5	µg/m <sup>3</sup>	
			Partikelkern (EC-Anteil, siehe 4.1)	3,5	µg/m <sup>3</sup>	
			NO <sub>2</sub> <sup>2)</sup>	40	µg/m <sup>3</sup>	
			Ethylbenzol	1000	µg/m <sup>3</sup>	
			Formaldehyd	10	µg/m <sup>3</sup>	
			Acetaldehyd	300	µg/m <sup>3</sup>	
			Platin	0,015	µg/m <sup>3</sup>	

<sup>1)</sup> Berechnungen basieren auf im wesentlichen auf einem sog. Trajektorienmodell, das auf drei verschiedene Transportwege in Mitteleuropa angewendet wurde, Angaben sind Mittelwerte über 4 Tage Transportzeit

<sup>2)</sup> Der Beurteilungswert ist in diesem Fall nicht als Äquivalenzfaktor zu verstehen.

Tab. 7-3b: Zusammenfassung der spezifischen Äquivalenzfaktoren und Beurteilungswerte für unterschiedliche Wirkungsindikatoren

Wirkungskategorie	Wirkungs-indikator	Bezeichnung	Substanz	Äquivalenzfaktor	Einheit	Quellenangabe
4.1. Kanzerogenität	<b>Unit Risk</b>	<b>Dosis-Wirkung Kanzerogenität</b>		<b>UR<sup>1)</sup><sub>i</sub></b>		[243]
Herleitung über Spezies Mensch	Partikelkern, EC (Spezies Mensch) <sup>2)</sup>			1 x 10 <sup>-3</sup>	1/(µg/m <sup>3</sup> )	Spezifizierender Hinweis
	Dieselpartikel ohne Partikelfilter			80%	EC-Anteil	
	Dieselpartikel mit Partikelfilter			20%	EC-Anteil	
	Ottopartikel ohne Filter			30%	EC-Anteil	
	Benzin-Direkteinspritzer ohne Filter			30%	EC-Anteil	
	Benzo(a)pyren, BaP (Spezies Mensch)			7 x 10 <sup>-6</sup>	1/(µg/m <sup>3</sup> )	
	Benzol (Spezies Mensch)			9,2 x 10 <sup>-2</sup>	1/(µg/m <sup>3</sup> )	
Herleitung über Spezies Ratte	Partikelkern, EC (Spezies Ratte)			1 x 10 <sup>-4</sup>	1/(µg/m <sup>3</sup> )	
	Formaldehyd (Spezies Ratte)			2,7 x 10 <sup>-7</sup>	1/(µg/m <sup>3</sup> )	
	Acetaldehyd (Spezies Ratte)			2,2 x 10 <sup>-6</sup>	1/(µg/m <sup>3</sup> )	
	1,3-Butadien (Spezies Ratte)			4,5 x 10 <sup>-6</sup>	1/(µg/m <sup>3</sup> )	
Datenlage unzureichend:	Ethylbenzol			k.A.		
	Platin			k.A.		
	Palladium			k.A.		
5. Direkte Ökotoxizität	<b>k.A.</b>	<b>k.A.</b>		<b>k.A.</b>		
6. Photochemische Oxidantienbildung	<b>POCP-Äquivalent</b>	<b>Ozonbildungspotential</b>		<b>POCP<sub>i</sub></b>		[55], [90], [116], [239], [256]
Alkane	Methan			0,007	kg <sub>Ethen</sub> /kg	[55] [66]
	Ethan			0,082	kg <sub>Ethen</sub> /kg	
Propan			0,42	kg <sub>Ethen</sub> /kg		
Olefine	Ethen / Ethylen			1	kg <sub>Ethen</sub> /kg	
Aromaten	Benzol			0,189	kg <sub>Ethen</sub> /kg	
				(0,33)	kg <sub>Ethen</sub> /kg	
Toluol			0,563	kg <sub>Ethen</sub> /kg		
Durchschnitt			0,761	kg <sub>Ethen</sub> /kg		
Alkohole	Methanol			0,123	kg <sub>Ethen</sub> /kg	
	Ethanol			0,268	kg <sub>Ethen</sub> /kg	
Aldehyde	Durchschnitt			0,196	kg <sub>Ethen</sub> /kg	
	Formaldehyd			0,421	kg <sub>Ethen</sub> /kg	
	Acetaldehyd			0,527	kg <sub>Ethen</sub> /kg	
Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe	Durchschnitt			0,443	kg <sub>Ethen</sub> /kg	
	NMHC (Durchschnitt)			0,416	kg <sub>Ethen</sub> /kg	
	NMHC (Ottoabgas)			0,5	kg <sub>Ethen</sub> /kg	
Kohlenwasserstoffe	NMHC (Dieselabgas)			0,7	kg <sub>Ethen</sub> /kg	
	HC (Durchschnitt)			0,377	kg <sub>Ethen</sub> /kg	

<sup>1)</sup> Für Kfz gilt: Die für Innerorts relevanten Stickstoffoxidemissionen werden für den Beurteilungswert Stickstoffdioxid im Verhältnis 2 : 3 für NO : NO<sub>2</sub> aufgeteilt.

<sup>2)</sup> Nachweis über Spezies Mensch gilt als nicht hinreichen sicher

Tab. 7-3c: Zusammenfassung der spezifischen Äquivalenzfaktoren und Beurteilungswerte für unterschiedliche Wirkungsindikatoren

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Bezeichnung	Substanz	Äquivalenzfaktor	Einheit	Quellenangabe	
7. Versauerung	<b>SO<sub>2</sub>-Äquivalent</b>	<b>Versauerungspotential</b>		<b>AP<sub>i</sub></b>		[55], [238]	
			Schwefeldioxid, SO <sub>2</sub>	1	kg <sub>SO2</sub> /kg		
					0,70	kg <sub>SO2</sub> /kg	
					1,07	kg <sub>SO2</sub> /kg	
					0,70	kg <sub>SO2</sub> /kg	
					1,88	kg <sub>SO2</sub> /kg	
					0,88	kg <sub>SO2</sub> /kg	
					1,60	kg <sub>SO2</sub> /kg	
8. Eutrophierung	<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-Äquivalent</b>	<b>Eutrophierungspotential</b>		<b>NP<sub>i</sub></b>		[55], [239], [256], [238]	
			Phosphor, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1	kg <sub>PO43</sub> /kg		
8.1. Aquatische Eutrophierung			Gesamtphosphor, P	3,06	kg <sub>PO43</sub> /kg		
			Chemischer Sauerstoffbedarf, CSB	0,022	kg <sub>PO43</sub> /kg		
			Ammonium, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,327	kg <sub>PO43</sub> /kg		
			Nitrat, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,128	kg <sub>PO43</sub> /kg		
	8.1. Terrestrische Eutrophierung			Stickstoffoxide, NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub>	0,13	kg <sub>PO43</sub> /kg	
			Stickstoffmonoxid, NO	0,20	kg <sub>PO43</sub> /kg		
			Stickstoffdioxid, NO <sub>2</sub>	0,13	kg <sub>PO43</sub> /kg		
			Ammoniak, NH <sub>3</sub>	0,327	kg <sub>PO43</sub> /kg		
9. Naturraumbeanspruchung (Fläche)	<b>Fläche (zeitbewertet)</b>	<b>Flächenverbrauch (zeitbewertet)</b>	Berechnung abhängig von Randbedingungen		-		

Tab. 7-4: Annahmen zur Flächenbemessung für den fließenden Verkehr [257]

Verkehrsart	$D_i$	$v_i$	$b_{erf}$	$FI_i$
Personenverkehr	[Pers/h]	[km/h]	[m]	[m <sup>2</sup> /Pers]
Gehen	1667	5,0	1,0	3
Fahrrad	1200	16,0	1,0	13
Pkw	780	35,0	3,5	158
Bus	1.080	20,0	3,3	62
Gelenkbus	1.728	20,0	3,4	39
Straßenbahn	2.280	18,0	3,4	27
S-Bahn	12.660	35,0	4,7	13
Verkehrsart	$D_i$	$v_i$	$b_{erf}$	$FI_i$
Güterverkehr	[Fz/h]	[km/h]	[m]	[m <sup>2</sup> /Fz]
Lkw	90	28,0	4,5	1.400
Sattelzug	90	28,0	4,75	1.478

Neben den Fahr- und Gehspuren sind zusätzlich Warteflächen, Stauräume, Aufstellspuren an den Knoten berücksichtigt. Daher sind die Flächenbedarfswerte höher als in anderen Untersuchungen.

Tab. 7-5: Bezugsdaten zur Flächenbemessung für den fließenden Verkehr [257]

Verkehrsart Personenverkehr	Entfernungs- Klasse	s <sub>x</sub> [km]	Fl <sub>t</sub> [m <sup>2</sup> *h/Pers]	Verkehrsart Personenverkehr	Entfernungs- Klasse	s <sub>x</sub> [km]	Fl <sub>t</sub> [m <sup>2</sup> *h/Pers]
Gehen	0 bis 4 km	2,5	1,5	Bus in Mischspur	0 bis 4 km	2,5	0,85
	4 bis 8 km	6,8	4		4 bis 8 km	6,8	2,21
	über 8 km	9,5	6		über 8 km	9,5	3,12
Fahrrad	0 bis 4 km	2,5	2	Gelenkbus auf eigener Spur	0 bis 4 km	2,5	5
	4 bis 8 km	6,8	6		4 bis 8 km	6,8	13
	Über 8 km	9,5	8		über 8 km	9,5	19
Pkw	0 bis 4 km	2,5	11	Straßenbahn	0 bis 4 km	2,5	4
	4 bis 8 km	6,8	31		4 bis 8 km	6,8	10
	über 8 km	9,5	43		über 8 km	9,5	14
Bus auf eigener Spur	0 bis 4 km	2,5	8	S-Bahn	0 bis 4 km	2,5	1
	4 bis 8 km	6,8	21		4 bis 8 km	6,8	3
	über 8 km	9,5	29		über 8 km	9,5	4
Verkehrsart Güterverkehr	s <sub>x</sub> [km]		Fl <sub>t</sub> [m <sup>2</sup> *h/Fz]	Verkehrsart Güterverkehr	s <sub>x</sub> [km]		Fl <sub>t</sub> [m <sup>2</sup> *h/Fz]
Lkw	7,9		395	Sattelzug	7,9		417

Tab. 7-6: Ansatz zur Flächenbemessung für den ruhenden Verkehr [257]

Verkehrsart Personenverkehr	momentan <sup>1)</sup> [m <sup>2</sup> /Pers]	Abstellplätze <sup>2)</sup> [m <sup>2</sup> *h/Pers]	Parkplätze am Ziel <sup>3)</sup> [m <sup>2</sup> *h/Pers]
Gehen	-	-	-
Fahrrad	2,1	19,2	16,8
Pkw <sup>4)</sup>	11,8	122,4	94,2
Bus	4,8	1,9	-
Straßenbahn	5	2,2	-
S-Bahn	3,2	0,7	-
Verkehrsart Güterverkehr	Momentan <sup>4)</sup> [m <sup>2</sup> /Fz]		
Lkw	27,5		
Sattelzug	45		
<sup>1)</sup> Werte nach [110] <sup>2)</sup> Berücksichtigung der Bereitstellungszeit des Platzes an 24 h/Tag für ein einzelnes Verkehrsmittel der Verkehrsart <sup>3)</sup> Parkplatz mit öffentlichem Charakter, Berücksichtigung eines durchschnittlichen Besetzungsgrades und einer durchschnittlichen Parkzeit (Arbeitstag, 8 Stunden) <sup>4)</sup> Durchschnittliche Fahrtzahl und Besetzungsgrad (3 Fahrten pro Tag und Besetzungsgrad 1,3) <sup>5)</sup> Werte nach StVZO (ohne Breitenzuschläge)			

Tab. 7-7: Vorschlag der UMK für zeitlich gestaffelte Anforderungen an ökologisch vertretbare Automobile [264]

Kriterien		Einheit	1999-2004	ab 2005
CO <sub>2</sub> -Emissionen nach RL 93/116/EWG		g/km	120 g <sub>CO2</sub> /km	90 g <sub>CO2</sub> /km
Verbrauch: (Benzin/Diesel)		l/100 km	5,16/4,46	3,88/3,42
Abgas- standards <sup>1)</sup>	Stufe	-	Frühzeitig Erfüllung EURO 4	EURO 4
	CO	g/km	1,0	1,0
	HC	g/km	0,1	0,1
	NO <sub>x</sub>	g/km	0,08	0,08
	PM	g/km	0,025	0,025
Lärmemissionen (Fahrgeräusch) <sup>2)</sup>		dB (A)	69	68
umweltverträglicher Stoffeinsatz		-	ja	ja
Recyclingkonzept (Recyclingpotential)		(Quote)	ja (85%)	ja (95%)
Ökoaudit		-	ja	ja
<sup>1)</sup> gemäß 98/69/EG einschl. Anforderungen für tiefe Temperaturen, Dauerhaltbarkeit und On-Board-Diagnose <sup>2)</sup> Fahrgeräusch Typprüfwert, nach Revision des Geräuschmessverfahrens durch die EU sind die Werte erneut festzulegen.				

Tab. 7-8a: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-1- Benzin (diese Arbeit)	-2- Benzin 2010	-3- Benzin 1990	-4- Benzin 2000
Quelle			[71], [122], [191]	[188]	[95]	[117]
Qualität			+++	+++	+	+
Primär- energie	Summe	MJ/MJ	1,182E+00	1,175E+00	1,130E+00	1,161E+00
	Erdöl	MJ/MJ	1,148E+00	1,142E+00	-	1,130E+00
	Erdgas	MJ/MJ	1,715E-02	1,600E-02	-	1,380E-02
	SK	MJ/MJ	5,671E-03	5,600E-03	-	6,400E-03
	BK	MJ/MJ	4,552E-03	4,700E-03	-	5,200E-03
	Uran	MJ/MJ	6,125E-03	6,200E-03	-	5,200E-03
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	4,501E-04	4,500E-04	-	6,000E-04
	Sonst. ET	MJ/MJ	1,110E-04	-	-	2,000E-04
Global	CO <sub>2</sub>	g/MJ	1,296E+01	1,269E+01	1,705E+01	1,180E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	1,610E-02	1,590E-02	1,037E-01	1,500E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	4,737E-04	4,700E-04	-	-

Tab. 7-8b: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-5- Benzin (aus Szenario)	-6- Benzin 1990	-7- Benzin 100 ppm S	-8- Benzin 2005
Quelle			[185]	[85]	[86]	[214]
Qualität			o	o	+	o
Primär- energie	Summe	MJ/MJ	1,264E+00	1,114E+00	1,210E+00	1,304E+00
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	1,337E-03	-	-	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	1,262E+00	-	-	-
Global	CO <sub>2</sub> <sup>1)</sup>	g/MJ	2,141E+01	5,526E+00	1,540E+01	2,248E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	1,054E-01	-	2,600E-02	4,353E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	4,634E-04	-	2,000E-03	3,975E-04

<sup>1)</sup> Abweichungen in -5-, -8- zu den verwendeten Werten (-1-) durch die Anwendung unterschiedlicher produktspezifischer Gewichtungsfaktoren für die Zuordnung der Energieströme in der Raffinerie

Tab. 7-8c: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-9-	-10-	-11-	-12-
			Benzin 1994	Benzin, US reformuliert '94	Benzin	Benzin
			[214]	[103]	[124]	[75]
			Quelle			
			Qualität	o	o	+++
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	1,292E+00	-	1,186E+00	1,150E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub> <sup>1)</sup>	g/MJ	2,174E+01	1,180E+01	1,313E+01	1,270E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	3,946E-02	5,308E-02	1,632E-02	4,700E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	3,975E-04	6,673E-03	4,598E-04	1,500E-02

<sup>1)</sup> Abweichungen in -9- zu den verwendeten Werten (-1-) durch die Anwendung unterschiedlicher produktspezifischer Gewichtungsfaktoren für die Zuordnung der Energieströme in der Raffinerie

Tab. 7-8d: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-13-	-14-	-15-	-16-
			Benzin 2000	Benzin Schweiz	Benzin Schweiz	Benzin
			[247]	[136]	[40]	[101]
			Quelle			
			Qualität	+	++	++
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	1,180E+00	1,274E+00	-	-
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	1,306E+01	1,634E+01	1,523E+01	1,799E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	-	1,029E-01	4,141E-02	1,130E-01
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	-	2,914E-04	1,992E-03	2,000E-04

Tab. 7-8e: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-17-	-18-	-19-	-20-
			Benzin Deutschland	Benzin 2005	Benzin Ø EU	Benzin Minimal
			[92]	[236]	[58]	[58]
			Quelle			
			Qualität	+	o	o
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	-	1,172E+00	-	-
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	9,200E+00	9,953E+00	1,536E+01	1,030E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	1,730E-02	-	4,150E-02	2,590E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	-	-	2,000E-03	2,000E-03

Tab. 7-8f: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-21-	-22-	-23-	-24-
			Benzin Maximal	Benzin 1995	Benzin benzol- arm 1995	Benzin
			[58]	[162]	[162]	[162]
			Quelle			
			Qualität	o	o	-
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	-	1,220E+00	1,230E+00	1,220E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	2,680E+01	1,371E+01	1,443E+01	1,376E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	5,320E-02	3,056E-02	3,056E-02	2,222E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	2,000E-03	-	-	-

Tab. 7-8g: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-25-	-26-	-27-	-28-
			Benzin benzol- arm 2000	Benzin 2005	Benzin benzol- arm 2005	Benzin 2010
			[162]	[162]	[162]	[118]
			Quelle			
			Qualität	-	--	++
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	1,230E+00	1,220E+00	1,230E+00	1,162E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	1,449E+01	1,338E+01	1,410E+01	1,148E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	2,222E-02	1,944E-02	2,222E-02	1,580E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	-	-	-	7,070E-03

Tab. 7-8h: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-29- Benzin, Kalifornien 2000	-30- Benzin, US Konventionell	-31- Benzin, US Phase 2 (A) <sup>1)</sup>	-32- Benzin, Kalif. Phase 2 (A) <sup>1)</sup>
			[103]	[288]	[288]	[288]
			Quelle			
			Qualität	o	++	++
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	-	2,247E-01	2,077E-01	2,234E-01
	Erdöl	MJ/MJ	-	1,065E-01	1,008E-01	1,082E-01
	Sonst. ET	MJ/MJ	-	2,155E-01	1,991E-01	2,141E-01
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	-	1,515E-02	1,393E-02	1,497E-02
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	-	2,121E-05	1,637E-05	1,754E-05
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	-	1,998E-07	1,824E-07	1,959E-07

<sup>1)</sup> US Federal Phase 2 Kraftstoffqualität, ohne Berücksichtigung zusätzlicher Energie für die Herstellung sauerstoffhaltiger Komponenten

Tab. 7-8i: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-33- Benzin, US Phase 2 (B) <sup>1)</sup>	-34- Benzin, Kalif. Phase 2 (B) <sup>1)</sup>	-35- Benzin	-36- Benzin, reformuliert
			[288]	[288]	[77]	[77]
			Quelle			
			Qualität	++	++	++
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	2,241E-01	2,345E-01	1,256E+00	1,277E+00
	Erdöl	MJ/MJ	9,171E-02	1,005E-01	1,220E+00	1,241E+00
	Erdgas	MJ/MJ	-	-	1,800E-02	1,800E-02
	SK	MJ/MJ	-	-	6,000E-03	6,000E-03
	BK	MJ/MJ	-	-	6,000E-03	6,000E-03
	Uran	MJ/MJ	-	-	6,000E-03	6,000E-03
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	-	-	0,000E+00	0,000E+00
	Sonst. ET	MJ/MJ	2,150E-01	2,250E-01	0,000E+00	0,000E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	1,621E-02	1,663E-02	1,269E+01	1,414E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	4,469E-05	3,931E-05	1,590E-02	1,700E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	2,186E-07	2,226E-07	4,700E-04	5,700E-04

<sup>1)</sup> US Federal Phase 2 und Kalifornische Phase 2 Kraftstoffqualität, unter Berücksichtigung zusätzlicher Energie für die Herstellung sauerstoffhaltiger Komponenten

Tab. 7-9a: Emissionsbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-1-	-2-	-3-	-4-
			Benzin (diese Arbeit)	Benzin 2010	Benzin 1990	Benzin 2000
Quelle			[71], [122], [191]	[188]	[95]	[117]
Qualität			+++	+++	+	+
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	5,177E-02	5,040E-02	7,783E-02	5,180E-02
	CO	g/MJ	7,784E-03	7,520E-03	1,729E-02	7,000E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,144E-02	3,120E-02	6,382E-02	2,376E-01
	NMHC	g/MJ	5,096E-02	5,050E-02	2,111E-01	3,830E-02
	Partikel	g/MJ	1,950E-03	1,930E-03	-	1,900E-03
	Staub	g/MJ	1,368E-03	1,330E-03	1,519E-02	1,200E-03
	HCl	g/MJ	1,525E-04	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	9,399E-06	9,200E-05	-	-
	FormA	g/MJ	1,693E-04	-	-	-
	Benzol	g/MJ	2,346E-04	2,400E-04	-	-
BaP	ng/MJ	6,952E+00	6,770E+00	-	-	
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	5,216E-06	0,000E+00	0,000E+00	-
	CO	g/MJ	9,631E-06	7,520E-06	1,510E-03	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,032E-04	9,360E-05	1,520E-03	-
	NMHC	g/MJ	9,459E-03	9,444E-03	3,200E-04	4,500E-03
	Partikel	g/MJ	2,296E-06	1,930E-06	-	-
	Staub	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-
	HCl	g/MJ	5,795E-09	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,159E-07	1,104E-06	-	-
	FormA	g/MJ	1,332E-06	-	-	-
	Benzol	g/MJ	3,707E-05	3,672E-05	-	5,000E-05
BaP	ng/MJ	4,473E-02	4,062E-02	-	-	
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,306E-02	4,229E-02	5,670E-02	3,540E-02
	CO	g/MJ	6,814E-03	6,535E-03	3,100E-03	4,900E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,578E-02	2,549E-02	1,770E-02	2,200E-01
	NMHC	g/MJ	4,085E-02	4,040E-02	3,000E-02	3,300E-02
	Partikel	g/MJ	1,328E-03	1,320E-03	-	3,000E-04
	Staub	g/MJ	1,330E-03	1,301E-03	1,085E-02	1,200E-03
	HCl	g/MJ	1,413E-04	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	6,700E-06	6,560E-05	-	-
	FormA	g/MJ	1,442E-04	-	-	-
	Benzol	g/MJ	1,897E-04	1,951E-04	-	3,000E-04
BaP	ng/MJ	5,851E+00	5,755E+00	-	-	
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	8,703E-03	8,114E-03	2,113E-02	1,640E-02
	CO	g/MJ	9,597E-04	9,776E-04	1,268E-02	2,100E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	5,554E-03	5,616E-03	4,460E-02	1,760E-02
	NMHC	g/MJ	6,481E-04	6,565E-04	1,808E-01	8,000E-04
	Partikel	g/MJ	6,196E-04	6,080E-04	-	1,600E-03
	Staub	g/MJ	3,780E-05	2,926E-05	4,340E-03	0,000E+00
	HCl	g/MJ	1,123E-05	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	2,583E-06	2,530E-05	-	-
	FormA	g/MJ	2,382E-05	-	-	-
	Benzol	g/MJ	7,863E-06	8,160E-06	-	0,000E+00
BaP	ng/MJ	1,057E+00	9,749E-01	-	-	

Tab. 7-9b: Emissionsbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-5-	-6-	-7-	-8-
			Benzin (aus Szenario)	Benzin 1990	Benzin 100 ppm S	Benzin 2005
		Quelle	[185]	[85]	[86]	[214]
		Qualität	o	o	+	o
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	8,234E-02	1,831E-02	2,700E-02	1,195E-01
	CO	g/MJ	2,434E-02	7,550E-03	5,000E-03	2,111E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	8,460E-02	2,060E-02	4,800E-02	6,441E-02
	NMHC	g/MJ	1,465E-01	8,600E-03 <sup>1)</sup>	5,000E-02	2,959E-02
	Staub	g/MJ	1,060E-02	1,750E-03 <sup>2)</sup>	-	-
	HCl	g/MJ	3,147E-04	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,522E-06	-	-	-
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	2,723E-04	1,800E-04	0,000E+00 <sup>3)</sup>	0,000E+00 <sup>3)</sup>
	CO	g/MJ	5,909E-04	3,510E-03	0,000E+00 <sup>3)</sup>	4,851E-04 <sup>3)</sup>
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,490E-03	1,414E-02	1,000E-02 <sup>3)</sup>	1,271E-03 <sup>3)</sup>
	NMHC	g/MJ	3,468E-04	3,040E-03 <sup>1)</sup>	3,000E-02 <sup>3)</sup>	1,816E-04 <sup>3)</sup>
	Partikel	g/MJ	-	-	-	2,989E-05 <sup>3)</sup>
	Staub	g/MJ	1,292E-04	1,010E-03 <sup>2)</sup>	-	-
	HCl	g/MJ	0,000E+00	-	-	-
NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,508E-06	-	-	-	
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,468E-02	1,773E-02	1,700E-02 <sup>4)</sup>	6,389E-02 <sup>4)</sup>
	CO	g/MJ	1,078E-02	4,000E-03	0,000E+00 <sup>4)</sup>	1,236E-02 <sup>4)</sup>
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,855E-02	6,340E-03	1,000E-02 <sup>4)</sup>	3,492E-02 <sup>4)</sup>
	NMHC	g/MJ	1,499E-01	5,370E-03 <sup>1)</sup>	1,700E-02 <sup>4)</sup>	1,981E-02 <sup>4)</sup>
	Partikel	g/MJ	-	-	-	-
	Staub	g/MJ	1,488E-03	6,800E-04 <sup>1)</sup>	-	4,056E-03 <sup>4)</sup>
	HCl	g/MJ	6,673E-06	-	-	-
NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,393E-08	-	-	-	
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	6,739E-02	4,000E-04	1,000E-02 <sup>5)</sup>	5,566E-02 <sup>5)</sup>
	CO	g/MJ	1,296E-02	4,000E-05	5,000E-03 <sup>5)</sup>	8,268E-03 <sup>5)</sup>
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	6,356E-02	1,200E-04	2,800E-02 <sup>5)</sup>	2,822E-02 <sup>5)</sup>
	NMHC	g/MJ	4 <sup>4)</sup>	1,900E-04 <sup>1)</sup>	3,000E-03 <sup>5)</sup>	9,601E-03 <sup>5)</sup>
	Staub	g/MJ	8,985E-03	6,000E-05 <sup>1)</sup>	-	3,998E-03 <sup>5)</sup>
	HCl	g/MJ	3,081E-04	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	0,000E+00	-	-	-

<sup>1)</sup> angegeben als HC      <sup>2)</sup> als Partikel bezeichnet      <sup>3)</sup> Kraftstoffverteilung  
<sup>4)</sup> Raffinerie      <sup>5)</sup> Erdölgewinnung, -Transport      <sup>4)</sup> wegen negativer berechneter Werte nicht berücksichtigt

Tab. 7-9c: Emissionsbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-9-	-10-	-11-	-12-
			Benzin 1994	Benzin, US reformuliert '94	Benzin	Benzin
Quelle			[214]	[103]	[124]	[75]
Qualität			o	o	+++	++
<b>OK</b> <b>I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,069E-01	8,108E-03	4,414E-02	-
	CO	g/MJ	1,928E-02	2,373E-02	8,046E-03	1,000E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	5,568E-02	4,152E-02	2,644E-02	3,000E-02
	NMHC	g/MJ	2,713E-02	4,592E-02	4,437E-02	5,100E-02
	Partikel	g/MJ	-	2,355E-03	-	-
	Staub	g/MJ	6,601E-03	-	1,379E-03	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-	-	6,897E-06	-
	Benzol	g/MJ	-	-	4,598E-04	-
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	0,000E+00 <sup>1)</sup>	8,207E-06 <sup>1)</sup>	-	-
	CO	g/MJ	6,046E-04 <sup>1)</sup>	7,312E-03 <sup>1)</sup>	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,117E-03 <sup>1)</sup>	1,639E-02 <sup>1)</sup>	-	-
	NMHC	g/MJ	2,253E-04 <sup>1)</sup>	1,604E-02 <sup>1)</sup>	-	-
	Partikel	g/MJ	1,057E-04 <sup>1)</sup>	3,775E-04 <sup>4)</sup>	-	-
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	6,211E-02 <sup>2)</sup>	6,229E-03 <sup>2)</sup>	-	-
	CO	g/MJ	1,150E-02 <sup>2)</sup>	2,281E-03 <sup>2)</sup>	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,064E-02 <sup>2)</sup>	8,937E-03 <sup>2)</sup>	-	-
	NMHC	g/MJ	1,864E-02 <sup>2)</sup>	5,154E-03 <sup>2)</sup>	-	-
	Partikel	g/MJ	-	1,124E-03 <sup>4)</sup>	-	-
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,483E-02 <sup>3a)</sup>	1,871E-03 <sup>3b)</sup>	-	-
	CO	g/MJ	7,175E-03 <sup>3a)</sup>	5,055E-03 <sup>3b)</sup>	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,293E-02 <sup>3a)</sup>	1,619E-02 <sup>3b)</sup>	-	-
	NMHC	g/MJ	8,268E-03 <sup>3a)</sup>	2,473E-02 <sup>3b)</sup>	-	-
	Partikel	g/MJ	-	8,535E-04 <sup>4)</sup>	-	-
Staub	g/MJ	3,212E-03 <sup>3a)</sup>	-	-	-	

<sup>1)</sup> Kraftstoffverteilung      <sup>2)</sup> Raffinerie      <sup>3a)</sup> Erdölgewinnung, -Transport  
<sup>4)</sup> siehe <sup>1)-3)</sup> angegeben als PM<sub>10</sub>      (incl. flüchtige Komponenten)      <sup>3b)</sup> Ölförderung und Extraktion  
(flüchtige Komponenten)

Tab. 7-9d: Emissionsbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-13-	-14-	-15-	-16-
			Benzin 2000	Benzin Schweiz	Benzin Schweiz	Benzin
Quelle			[247]	[136]	[40]	[101]
Qualität			+	++	++	++
<b>OK</b> <b>I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,981E-02	9,745E-02	6,250E-02	1,067E-01
	CO	g/MJ	7,682E-03	1,462E-02	1,992E-02	1,690E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,119E-02	6,930E-01	5,859E-02	-
	NMHC	g/MJ	5,098E-02	2,615E-01	4,688E-02	2,050E-01
	Partikel	g/MJ	1,862E-03	-	0,000E+00	-
	Staub	g/MJ	-	3,418E-02	-	4,400E-02

Tab. 7-9e: Emissionsbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-17-	-18-	-19-	-20-
			Benzin Deutschland	Benzin 2005	Benzin Ø EU	Benzin Minimal
Quelle			[92]	[236]	[58]	[58]
Qualität			+	o	o	o
<b>OK</b> <b>I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	7,810E-02	6,368E-02	6,300E-02	2,710E-02
	CO	g/MJ	5,100E-03	6,524E-03	2,000E-02	5,000E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	4,320E-02	4,505E-02	-	-
	NMHC	g/MJ	2,083E-01	-	4,730E-02	1,830E-02
	Staub	g/MJ	2,200E-03	3,417E-03	4,100E-03	1,000E-04

Tab. 7-9f: Emissionsbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-21-	-22-	-23-	-24-
			Benzin Maximal	Benzin 1995	Benzin benzol- arm 1995	Benzin 2000
Quelle			[58]	[162]	[162]	[162]
Qualität			o	o	o	-
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	9,740E-02	4,444E-02	4,444E-02	4,444E-02
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	4,250E-02	1,111E-02	1,111E-02	1,111E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	-	3,889E-02	3,889E-02	3,889E-02
	NMHC	g/MJ	7,360E-02	1,556E-01	1,556E-01	1,556E-01
	Staub	g/MJ	9,100E-03	2,778E-03	2,778E-03	2,778E-03

Tab. 7-9g: Emissionsbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-25-	-26-	-27-	-12-
			Benzin benzol- arm 2000	Benzin 2005	Benzin benzol- arm 2005	Benzin 2010
Quelle			[162]	[162]	[162]	[118]
Qualität			-	--	--	++
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,444E-02	4,444E-02	4,444E-02	4,800E-02
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	1,111E-02	1,111E-02	1,111E-02	6,810E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	4,167E-02	3,889E-02	3,889E-02	3,0E-02
	NMHC	g/MJ	1,556E-01	1,556E-01	1,556E-01	4,380E-02
	Partikel	g/MJ	-	-	-	1,380E-03
	Staub	g/MJ	2,778E-03	2,778E-03	2,778E-03	1,620E-03

Tab. 7-9h: Emissionsbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-29-	-30-	-31-	-32-
			Benzin, Kalifornien 2000	Benzin, US Konventionell	Benzin, US Phase 2 (A) <sup>1)</sup>	Benzin, Kalif. Phase 2 (A) <sup>1)</sup>
Quelle			[103]	[288]	[288]	[288]
Qualität			o	++	++	++
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	7,074E-03	1,848E-05	1,725E-05	1,851E-05
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	6,303E-03	1,093E-05	9,778E-06	1,029E-05
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,530E-02	2,723E-05	2,528E-05	2,683E-05
	NMHC	g/MJ	3,604E-02	1,329E-05	1,318E-05	1,331E-05
	Partikel	g/MJ	2,027E-03 <sup>2)</sup>	2,986E-06 <sup>2)</sup>	2,809E-06	2,989E-06
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	-	1,706E-07	1,715E-07	1,721E-07
	CO	g/MJ	-	1,364E-06	1,372E-06	1,376E-06
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	-	2,259E-06	2,273E-06	2,284E-06
	NMHC	g/MJ	-	4,578E-06	4,578E-06	4,579E-06
	Partikel	g/MJ	-	1,649E-07 <sup>2)</sup>	1,661E-07	1,665E-07

<sup>1)</sup> Kalifornische Phase 2 Kraftstoffqualität, ohne Berücksichtigung zusätzlicher Energie für die Herstellung sauerstoffhaltiger Komponenten  
<sup>2)</sup> angegeben als PM<sub>10</sub>

Tab. 7-9i: Emissionsbilanzdaten für Benzinkraftstoffe

			-33-	-34-	-35-	-36-
			Benzin, US Phase 2 (B) <sup>1)</sup>	Benzin, Kalif. Phase 2 (B) <sup>1)</sup>	Benzin	Benzin, reformuliert
Quelle			[288]	[288]	[77]	[77]
Qualität			++	++	++	++
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,748E-05	1,857E-05	5,040E-02	5,260E-02
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	1,550E-05	1,466E-05	7,520E-03	8,220E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,990E-05	3,025E-05	3,120E-02	3,250E-02
	NMHC	g/MJ	1,326E-05	1,336E-05	5,050E-02	5,160E-02
	Partikel	g/MJ	2,913E-06 <sup>2)</sup>	3,052E-06 <sup>2)</sup>	2,000E-03	2,000E-03
	Staub	g/MJ	-	-	1,000E-03	1,000E-03
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-	-	9,200E-06	9,200E-06
	Benzol	g/MJ	-	-	2,400E-06	2,400E-06
	BaP	ng/MJ	-	-	6,800E-09	6,800E-09
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,967E-07	1,915E-07	-	-
	CO	g/MJ	1,579E-06	1,536E-06	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,560E-06	2,505E-06	-	-
	NMHC	g/MJ	4,633E-06	4,622E-06	-	-
	Partikel	g/MJ	1,898E-07 <sup>2)</sup>	1,848E-07 <sup>2)</sup>	-	-

<sup>1)</sup> US Federal Phase 2 und Kalifornische Phase 2 Kraftstoffqualität, unter Berücksichtigung zusätzlicher Energie für die Herstellung sauerstoffhaltiger Komponenten  
<sup>2)</sup> angegeben als PM<sub>10</sub>

Tab. 7-10a: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Dieselkraftstoffe

			-1-	-2-	-3-	-4-
			Diesel (diese Arbeit)	Diesel 2010	Diesel 1990	Diesel 2000
Quelle			[71], [122], [191]	[188]	[95]	[117]
Qualität			+++	+++	+	+
<b>Primär-energie</b>	Summe	MJ/MJ	1,127E+00	1,122E+00	1,100E+00	1,112E+00
	Erdöl	MJ/MJ	1,104E+00	1,099E+00	-	1,091E+00
	Erdgas	MJ/MJ	1,337E-02	1,200E-02	-	1,040E-02
	SK	MJ/MJ	3,443E-03	3,500E-03	-	3,900E-03
	BK	MJ/MJ	2,784E-03	2,900E-03	-	3,000E-03
	Uran	MJ/MJ	3,725E-03	3,900E-03	-	3,000E-03
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	2,847E-04	2,900E-04	-	4,000E-04
	Sonst. ET	MJ/MJ	6,740E-05	-	-	1,000E-04
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	9,295E+00	9,130E+00	9,480E+00	8,300E+00
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	1,365E-02	1,360E-02	1,003E-01	1,200E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	3,501E-04	3,400E-04	-	-

Tab. 7-10b: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Dieselkraftstoffe

			-5-	-6-	-7-	-8-
			Diesel-Referenz	Diesel (aus Szenario)	Diesel	Diesel 10ppm
Quelle			[121]	[185]	[85]	[86]
Qualität			+	o	o	+
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	1,113E+00	1,137E+00	1,041E+00	1,140E+00
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	-	9,044E-04	-	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	-	1,136E+00	-	-
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub> <sup>1)</sup>	g/MJ	8,431E+00	1,256E+01	5,337E+00	1,040E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	1,409E-02	8,882E-02	-	2,600E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	2,824E-04	2,816E-04	-	1,500E-02

Tab. 7-10c: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Dieselkraftstoffe

			-9- Diesel 1994	-10- Diesel 2005	-11- Diesel	-12- Diesel
			[214]	[214]	[124]	[75]
			Quelle	Quelle	Quelle	Quelle
			Qualität	Qualität	Qualität	Qualität
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	1,155E+00	1,166E+00	1,144E+00	1,110E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub> <sup>1)</sup>	g/MJ	1,280E+01	1,361E+01	9,482E+00	9,100E+00
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	2,811E-02	3,163E-02	1,412E-02	3,000E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	2,482E-04	2,482E-04	2,353E-04	1,600E-02

Tab. 7-10d: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Dieselkraftstoffe

			-13- Diesel- 2010	-14- Diesel 2000	-15- Diesel Schweiz	-16- Diesel Schweiz
			172	[247]	[136]	[40]
			Quelle	Quelle	Quelle	Quelle
			Qualität	Qualität	Qualität	Qualität
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	1,115E+00	1,124E+00	1,177E+00	-
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	8,268E+00	1,143E+01	9,286E+00	1,055E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	1,390E-02	-	9,429E-02	3,473E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	6,970E-03	-	1,679E-04	1,495E-03

Tab. 7-10e: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Dieselkraftstoffe

			-17- Diesel	-18- Diesel	-19- Diesel 2005	-20- Diesel 2005
			[101]	[92]	[236]	[58]
			Quelle	Quelle	Quelle	Quelle
			Qualität	Qualität	Qualität	Qualität
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	-	-	1,092E+00	-
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	1,010E+01	6,900E+00	9,201E+00	1,032E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	1,000E+00	1,570E-02	-	3,490E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	2,000E-04	-	-	1,500E-03

Tab. 7-10f: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Dieselkraftstoffe

			-21- Diesel	-22- Diesel	-23- Diesel 1995	-24- Diesel schwefelarm, 95
			[58]	[58]	[162]	[162]
			Quelle	Quelle	Quelle	Quelle
			Qualität	Qualität	Qualität	Qualität
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	-	-	1,090E+00	1,090E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	6,900E+00	1,040E+01	5,550E+00	5,567E+00
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	2,600E-01	4,400E-02	1,389E-02	1,389E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	1,500E-03	1,500E-03	-	-

Tab. 7-10g: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Dieselkraftstoffe

			-25- Diesel 2000	-26- Diesel schwefelarm 2000	-27- Diesel 2005	-28- Diesel schwefelarm 2005
			[162]	[162]	[162]	[162]
			Quelle	Quelle	Quelle	Quelle
			Qualität	Qualität	Qualität	Qualität
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	1,090E+00	1,090E+00	1,090E+00	1,090E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	5,567E+00	5,583E+00	5,439E+00	4,622E+00
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	1,389E-02	1,389E-02	1,389E-02	1,389E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	-	-	-	-

Tab. 7-10h: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Dieselkraftstoffe

		-29- -30- -31- -32-				
		Diesel	Diesel reformuliert (RFD)	Diesel (ohne Infrastruktur)	Reformulierter Diesel	
		[288]	[288]	[77]	[77]	
Quelle						
Qualität		++ ++ ++ ++				
<b>Primär-energie</b>	Summe	MJ/MJ	1,602E-01	1,898E-01	1,201E+00	1,243E+00
	Erdöl	MJ/MJ	7,787E-02	9,190E-02	1,176E+00	1,219E+00
	Erdgas	MJ/MJ	-	-	1,332E-02	1,332E-02
	SK	MJ/MJ	-	-	3,696E-03	3,696E-03
	BK	MJ/MJ	-	-	3,444E-03	3,444E-03
	Uran	MJ/MJ	-	-	3,900E-03	3,900E-03
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	-	-	2,900E-04	2,900E-04
	Sonst. ET	MJ/MJ	1,534E-01	1,819E-01	0,000E+00	0,000E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	1,078E-02	1,274E-02	9,130E+00	1,208E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	1,273E-05	1,496E-05	1,360E-02	1,580E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	1,414E-07	1,669E-07	3,400E-04	5,400E-04

Tab. 7-11a: Emissionsbilanzdaten für Dieselkraftstoffe

		-1- -2- -3- -4-				
		Diesel (diese Arbeit)	Diesel 2010	Diesel 1990	Diesel 2000	
		[71], [122], [191]	[188]	[95]	[117]	
Quelle						
Qualität		+++ +++ + +				
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,113E-02	4,000E-02	3,563E-02	4,390E-02
	CO	g/MJ	6,997E-03	6,770E-03	1,511E-02	6,300E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,724E-02	2,710E-02	5,075E-02	3,520E-02
	NMHC	g/MJ	1,515E-02	1,490E-02	1,827E-01	9,500E-03
	Partikel	g/MJ	1,866E-03	1,850E-03	-	1,800E-03
	Staub	g/MJ	1,142E-03	1,110E-03	6,640E-03	1,000E-03
	HCl	g/MJ	1,067E-04	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	9,043E-06	8,900E-06	-	-
	FormA	g/MJ	1,527E-04	-	-	-
	Benzol	g/MJ	9,066E-05	1,000E-04	-	-
	BaP	ng/MJ	5,752E+00	5,606E+00	-	-
	<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	5,286E-06	0,000E+00	0,000E+00
CO		g/MJ	9,761E-06	6,770E-06	1,530E-03	-
NO <sub>x</sub>		g/MJ	1,046E-04	1,084E-04	1,550E-03	-
NMHC		g/MJ	8,427E-06	1,490E-05	3,200E-04	-
Partikel		g/MJ	2,327E-06	1,850E-06	-	-
Staub		g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
HCl		g/MJ	5,874E-09	-	-	-
NH <sub>3</sub>		g/MJ	1,175E-07	1,157E-07	-	-
FormA		g/MJ	1,350E-06	-	-	-
Benzol		g/MJ	3,168E-07	3,000E-07	-	-
BaP		ng/MJ	4,534E-02	4,485E-02	-	-
<b>OK II</b>		SO <sub>2</sub>	g/MJ	3,287E-02	3,232E-02	1,450E-02
	CO	g/MJ	6,079E-03	5,836E-03	9,000E-04	4,300E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,191E-02	2,171E-02	4,600E-03	1,820E-02
	NMHC	g/MJ	1,454E-02	1,429E-02	1,600E-03	8,700E-03
	Partikel	g/MJ	1,278E-03	1,271E-03	-	3,000E-04
	Staub	g/MJ	1,107E-03	1,083E-03	2,300E-03	1,000E-03
	HCl	g/MJ	9,603E-05	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	6,465E-06	6,364E-06	-	-
	FormA	g/MJ	1,287E-04	-	-	-
	Benzol	g/MJ	8,284E-05	9,160E-05	-	-
	BaP	ng/MJ	4,703E+00	4,642E+00	-	-
	<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	8,263E-03	7,680E-03	2,113E-02
CO		g/MJ	9,079E-04	9,275E-04	1,268E-02	2,000E-03
NO <sub>x</sub>		g/MJ	5,228E-03	5,285E-03	4,460E-02	1,700E-02
NMHC		g/MJ	6,091E-04	5,960E-04	1,808E-01	8,000E-04
Partikel		g/MJ	5,861E-04	5,772E-04	-	1,500E-03
Staub		g/MJ	3,575E-05	2,664E-05	4,340E-03	0,000E+00
HCl		g/MJ	1,069E-05	-	-	-
NH <sub>3</sub>		g/MJ	2,460E-06	2,421E-06	-	-
FormA		g/MJ	2,266E-05	-	-	-
Benzol		g/MJ	7,503E-06	8,100E-06	-	-
BaP		ng/MJ	1,004E+00	9,194E-01	-	-

Tab. 7-11b: Emissionsbilanzdaten für Dieseldieselkraftstoffe

			-5-	-6-	-7-	-8-
			Diesel-Referenz	Diesel	Diesel	Diesel
				(aus Szenario)		10ppm
Quelle			[121]	[185]	[85]	[86]
Qualität			+	o	o	+
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	3,781E-02	7,027E-02	-	2,000E-02
	CO	g/MJ	-	1,843E-02	-	5,000E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,849E-02	7,115E-02	-	4,400E-02
	NMHC	g/MJ	1,412E-02	1,568E-02	-	1,300E-02
	Partikel	g/MJ	7,144E-04	-	-	-
	Staub	g/MJ	1,334E-03	9,861E-03	-	-
	HCl	g/MJ	9,624E-02	2,850E-04	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	2,353E-03	1,561E-06	-	-
	FormA	g/MJ	7,529E-05	-	-	-
	Benzol	g/MJ	-	-	-	-
	BaP	ng/MJ	-	-	-	-
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	Σ(OKI + OKII)	-7,949E-02	1,800E-04	0,000E+00 <sup>2)</sup>
	CO	g/MJ	-	-1,172E-01	3,590E-03	0,000E+00 <sup>2)</sup>
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	Σ(OKI + OKII)	-1,485E-01	1,448E-02	1,000E-02 <sup>2)</sup>
	NMHC	g/MJ	Σ(OKI + OKII)	-2,001E-02	3,110E-03	0,000E+00 <sup>2)</sup>
	Partikel	g/MJ	Σ(OKI + OKII)	-	-	-
	Staub	g/MJ	Σ(OKI + OKII)	-1,573E-02	1,040E-03	-
	HCl	g/MJ	Σ(OKI + OKII)	0,000E+00	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	Σ(OKI + OKII)	-4,829E-04	-	-
	FormA	g/MJ	Σ(OKI + OKII)	-	-	-
	Benzol	g/MJ	Σ(OKI + OKII)	-	-	-
	BaP	ng/MJ	Σ(OKI + OKII)	-	-	-
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	3,216E-02 <sup>1)</sup>	8,359E-02	1,708E-02	1,000E- <sup>3)</sup>
	CO	g/MJ	-	1,209E-01	3,000E-03	0,000E+00 <sup>3)</sup>
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,527E-02 <sup>1)</sup>	1,572E-01	6,100E-03	6,000E-03 <sup>3)</sup>
	NMHC	g/MJ	1,412E-02 <sup>1)</sup>	3,258E-02	5,170E-03	1,000E-02 <sup>3)</sup>
	Partikel	g/MJ	4,518E-04 <sup>1)</sup>	-	-	-
	Staub	g/MJ	1,334E-03 <sup>1)</sup>	1,658E-02	6,600E-04	-
	HCl	g/MJ	9,624E-02 <sup>1)</sup>	-3,205E-06	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	2,353E-03 <sup>1)</sup>	4,845E-04	-	-
	FormA	g/MJ	7,529E-05 <sup>1)</sup>	-	-	-
	Benzol	g/MJ	7,976E-05 <sup>1)</sup>	-	-	-
	BaP	ng/MJ	3,365E+00 <sup>1)</sup>	-	-	-
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	5,647E-03	6,617E-02	4,100E-04	1,000E-02
	CO	g/MJ	-	1,477E-02	4,000E-05	5,000E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,224E-03	6,250E-02	1,200E-04	2,800E-02
	NMHC	g/MJ	-	3,114E-03	1,900E-04	3,000E-03
	Partikel	g/MJ	2,626E-04	-	-	-
	Staub	g/MJ	-	9,007E-03	-	6,000E-05
	HCl	g/MJ	-	2,882E-04	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-	0,000E+00	-	-
	FormA	g/MJ	-	-	-	-
	Benzol	g/MJ	-	-	-	-
	BaP	ng/MJ	-	-	-	-

1) Zusammenfassung von OK I und OK II      2) Kraftstoffverteilung      4) Erdölgewinnung, -Transport  
3) Raffinerie

Tab. 7-11c: Emissionsbilanzdaten für Dieseldieselkraftstoffe

			-9- Diesel 1994	-10- Diesel 2005	-11- Diesel	-12- Diesel
			[214]	[214]	[124]	[75]
Quelle						
Qualität			o	o	+++	++
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	8,312E-02	9,989E-02	3,388E-02	-
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	1,442E-02	1,617E-02	6,824E-03	1,000E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	4,442E-02	5,260E-02	2,282E-02	3,000E-02
	NMHC	g/MJ	2,485E-02	2,711E-02	1,482E-02	-
	Staub	g/MJ	-	-	1,176E-03	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-	-	7,059E-06	-
	Benzol	g/MJ	-	-	9,412E-05	-
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
	CO	g/MJ	6,188E-04	4,965E-04	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,167E-03	1,301E-03	-	-
	NMHC	g/MJ	2,306E-04	1,859E-04	-	-
	Partikel	g/MJ	1,082E-04	3,059E-05	-	-
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,303E-02	5,011E-02	-	-
	CO	g/MJ	7,389E-03	8,278E-03	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,175E-02	2,606E-02	-	-
	NMHC	g/MJ	1,722E-02	1,833E-02	-	-
	Staub	g/MJ	2,833E-03	3,472E-03	-	-
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,009E-02	4,978E-02	-	-
	CO	g/MJ	6,417E-03	7,394E-03	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,050E-02	2,524E-02	-	-
	NMHC	g/MJ	7,394E-03	8,586E-03	-	-
	Staub	g/MJ	2,872E-03	3,575E-03	-	-

<sup>1)</sup> Kraftstoffverteilung (Lkw-Transport)      <sup>2)</sup> Raffinerie      <sup>3)</sup> Erdölgewinnung, -Transport

Tab. 7-11d: Emissionsbilanzdaten für Dieseldieselkraftstoffe

			-13- Diesel- 2010	-14- Diesel 2000	-15- Diesel Schweiz	-16- Diesel Schweiz
			172	[247]	[136]	[40]
Quelle						
Qualität			++	+	++	++
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,070E-02	3,934E-02	5,536E-02	5,275E-02
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	6,090E-03	6,983E-03	1,386E-02	1,451E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,910E-02	2,700E-02	5,679E-02	5,275E-02
	NMHC	g/MJ	1,480E-02	1,513E-02	1,975E-01	3,253E-02
	Partikel	g/MJ	1,330E-03	1,862E-03	3,036E-02	-
	Staub	g/MJ	1,290E-03	-	-	-
	Benzol	g/MJ	7,600E-05	-	-	-

Tab. 7-11e: Emissionsbilanzdaten für Dieseldieselkraftstoffe

			-17- Diesel	-18- Diesel	-19- Diesel 2005	-20- Diesel 2005
			[101]	[92]	[236]	[58]
Quelle						
Qualität			++	+	o	o
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	5,900E-02	5,780E-02	5,833E-02	5,100E-02
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	1,580E-02	4,600E-03	6,169E-03	1,430E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	6,300E-02	3,710E-02	4,150E-02	5,150E-02
	NMHC	g/MJ	1,900E-01	8,730E-02	-	3,270E-02
	Partikel	g/MJ	3,900E-02	1,200E-03	-	4,900E-03
	Staub	g/MJ	-	2,200E-03	3,085E-03	-

Tab. 7-11f: Emissionsbilanzdaten für Dieseldieselkraftstoffe

			-21- Diesel	-22- Diesel	-23- Diesel 1995	-24- Diesel schwefelarm, 95
			[58]	[58]	[162]	[162]
			o	o	o	-
Quelle						
Qualität						
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	2,000E-02	8,200E-02	3,056E-02	3,056E-02
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	4,200E-03	4,010E-02	8,333E-03	8,333E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,500E-02	1,050E+00	2,778E-02	2,778E-02
	NMHC	g/MJ	1,500E-02	5,000E-02	1,944E-02	1,944E-02
	Partikel	g/MJ	1,000E-04	2,100E-02	-	-
	Staub	g/MJ	-	-	2,778E-03	2,778E-03

Tab. 7-11g: Emissionsbilanzdaten für Dieseldieselkraftstoffe

			-25- Diesel 2000	-26- Diesel schwefelarm 2000	-27- Diesel 2005	-28- Diesel schwefelarm 2005
			[162]	[162]	[162]	[162]
			-	--	--	---
Quelle						
Qualität						
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	3,056E-02	3,056E-02	3,056E-02	3,056E-02
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	8,333E-03	8,333E-03	8,333E-03	8,333E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,056E-02	3,056E-02	2,778E-02	2,778E-02
	NMHC	g/MJ	1,944E-02	1,944E-02	1,944E-02	1,944E-02
	Staub	g/MJ	2,778E-03	2,778E-03	2,778E-03	2,778E-03

Tab. 7-11h: Emissionsbilanzdaten für Dieseldieselkraftstoffe

			-29- Diesel	-30- Diesel reformuliert (RFD)	-31- Diesel (ohne Infrastruktur)	-32- Reformulierter Diesel
			[288]	[288]	[77]	[77]
			++	++	++	++
Quelle						
Qualität						
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,343E-05	1,586E-05	4,000E-02	4,430E-02
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	7,912E-06	8,892E-06	6,700E-03	7,400E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,012E-05	2,309E-05	2,710E-02	2,960E-02
	NMHC	g/MJ	5,243E-06	5,508E-06	1,490E-02	1,710E-02
	Partikel	g/MJ	2,229E-06 <sup>1)</sup>	2,580E-06 <sup>1)</sup>	2,000E-03	2,000E-03
	Staub	g/MJ	-	-	1,000E-03	1,000E-03
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-	-	8,900E-06	8,900E-06
	Benzol	g/MJ	-	-	1,000E-04	1,000E-04
	BaP	ng/MJ	-	-	5,600E-09	5,600E-09
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,519E-07	1,536E-07	-	-
	CO	g/MJ	1,216E-06	1,228E-06	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,007E-06	2,036E-06	-	-
	NMHC	g/MJ	1,556E-06	1,564E-06	-	-
	Partikel	g/MJ	1,475E-07 <sup>1)</sup>	1,487E-07 <sup>1)</sup>	-	-

<sup>1)</sup> angegeben als PM<sub>10</sub>

Tab. 7-12a: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für komprimiertes Erdgas

			-1- CNG	-2- CNG 250 bar	-3- CNG	-4- CNG
Quelle			[71], [76], [122]	[95]	[185]	[86]
Qualität			+++	++	+	++
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	1,206E+00	1,240E+00	1,156E+00	1,140E+00
	Erdöl	MJ/MJ	1,390E-03	-	-	-
	Erdgas	MJ/MJ	1,116E+00	-	-	-
	SK	MJ/MJ	2,200E-02	-	-	-
	BK	MJ/MJ	2,691E-02	-	-	-
	Uran	MJ/MJ	3,661E-02	-	-	-
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	2,528E-03	-	1,178E-03	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	6,635E-04	-	1,155E+00	-
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	1,149E+01	1,377E+01	1,188E+01	8,000E+00
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	2,270E-01	2,106E-01	1,687E-01	1,880E-01 <sup>1)</sup>
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	2,906E-04	-	3,607E-04	5,000E-04

<sup>1)</sup> einschließlich 1% Leckageverluste

Tab. 7-12b: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für komprimiertes Erdgas

			-5- CNG	-6- CNG	-7- CNG	-8- CNG Schweiz
Quelle			[85]	[288]	[92]	[40]
Qualität			+	++	o	+
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	1,122E+00	1,343E-01	-	-
	Erdöl	MJ/MJ	-	1,944E-03	-	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	-	1,037E-01	-	-
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	7,612E+00	8,018E-03	4,100E+00	1,152E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	-	1,892E-05	2,237E-01	3,605E-01
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	-	9,378E-08	-	4,938E-04

Tab. 7-12c: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für komprimiertes Erdgas

			-9- CNG	-10- CNG 250 bar	-11- CNG	-12- CNG 250 bar (2005)
Quelle			[101]	[75]	[58]	[162]
Qualität			+	++	o	--
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	-	1,125E+00	-	1,120E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	6,787E+00	5,900E+00	1,131E+01	6,597E+00
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	3,700E-01	3,000E-01	1,593E-01	2,556E-01
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	-	1,400E-02	-	-

Tab. 7-13a: Emissionsbilanzdaten für komprimiertes Erdgas

		-1- -2- -3- -4-				
		CNG	CNG 250 bar	CNG <sup>1)</sup>	CNG	
		Quelle Qualität	[71], [76], [122]	[95]	[185]	[86]
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	<b>2,111E-02</b>	<b>3,800E-02</b>	<b>5,411E-05</b>	<b>0,000E+00</b>
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	8,454E-03	1,230E-02	1,703E-02	5,300E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,955E-02	3,276E-02	3,270E-02	1,580E-02
	NMHC	g/MJ	3,419E-02	3,124E-02	[0,000E+00]	2,800E-03
	Partikel	g/MJ	1,305E-04	0,000E+00-		-
	Staub	g/MJ	1,055E-03	3,240E-03	1,284E-03	-
	HCl	g/MJ	3,102E-04	-	1,077E-04	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,098E-06	-	2,005E-08	-
	FormA	g/MJ	7,755E-06	-	-	-
	Benzol	g/MJ	3,859E-06	-	-	-
	BaP	ng/MJ	2,463E-01	-	-	-
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	0,000E+00		[0,000E+00]	0,000E+00
	CO	g/MJ	0,000E+00		[0,000E+00]	0,000E+00
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	0,000E+00		[0,000E+00]	0,000E+00
	NMHC	g/MJ	0,000E+00		[0,000E+00]	0,000E+00
	Partikel	g/MJ	0,000E+00		-	-
	Staub	g/MJ	0,000E+00		[0,000E+00]	-
	HCl	g/MJ	0,000E+00		0,000E+00	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	0,000E+00		[0,000E+00]	-
	FormA	g/MJ	0,000E+00	-		-
	Benzol	g/MJ	0,000E+00	-		-
	BaP	ng/MJ	0,000E+00	-		-
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,710E-02	8,700E-03	2,140E-03	0,000E+00
	CO	g/MJ	6,956E-03	3,400E-03	1,674E+00	0,000E+00
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,442E-02	8,960E-03	2,086E-01	1,800E-03
	NMHC	g/MJ	3,007E-02	5,940E-03	3,374E-01	3,000E-04
	Partikel	g/MJ	2,365E-05	-		-
	Staub	g/MJ	8,342E-04	1,140E-03	8,854E-04	-
	HCl	g/MJ	3,090E-04		3,072E-05	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	8,300E-07		6,667E-03	-
	FormA	g/MJ	5,043E-06	-		-
	Benzol	g/MJ	3,221E-06	-		-
	BaP	ng/MJ	1,086E-01	-		-
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,012E-03	2,930E-02	[0,000E+00]	0,000E+00
	CO	g/MJ	1,498E-03	8,900E-03	9,430E-03	5,300E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	5,130E-03	2,380E-02	2,411E-02	1,400E-02
	NMHC	g/MJ	4,121E-03	2,530E-02	[0,000E+00]	2,500E-03
	Partikel	g/MJ	1,068E-04	-		-
	Staub	g/MJ	2,205E-04	2,100E-03	3,986E-04	-
	HCl	g/MJ	1,207E-06		7,695E-05	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	2,683E-07		0,000E+00	-
	FormA	g/MJ	2,712E-06	-		-
	Benzol	g/MJ	6,384E-07	-		-
	BaP	ng/MJ	1,377E-01	-		-

<sup>1)</sup> [0,000E+00] negative Bilanzwerte <<0 ergeben sich aus Rückrechnung von Szenarien und werden daher gleich Null gesetzt.

Tab. 7-13b: Emissionsbilanzdaten für komprimiertes Erdgas

			-5-	-6-	-7-	-8-
			CNG	CNG	CNG	CNG Schweiz
			[85]	[288]	[92]	[40]
Quelle						
Qualität			+	++	o	+
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	3,380E-02	1,601E-05	1,690E-02	9,877E-03
	CO	g/MJ	3,620E-03	7,447E-06	1,400E-03	6,584E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,088E-02	2,803E-05	1,060E-02	2,881E-02
	NMHC	g/MJ	2,125E-02	2,083E-06	2,750E-02	1,934E-02
	Partikel	g/MJ	-	1,189E-06 <sup>3)</sup>	8,000E-04	0,000E+00
	Staub	g/MJ	4,940E-03 <sup>1)</sup>	-	-	-
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	0,000E+00	4,240E-08	0,000E+00	-
	CO	g/MJ	0,000E+00	5,147E-06	0,000E+00	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	0,000E+00	1,439E-05	0,000E+00	-
	NMHC	g/MJ	0,000E+00 <sup>2)</sup>	1,436E-06	0,000E+00	-
	Partikel	g/MJ	-	2,374E-07 <sup>3)</sup>	0,000E+00	-
	Staub	g/MJ	0,000E+00 <sup>1)</sup>	-	-	-
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	3,378E-02	-	1,490E-02	-
	CO	g/MJ	2,920E-03	-	4,000E-04	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	9,680E-03	-	6,500E-03	-
	NMHC	g/MJ	1,490E-02 <sup>2)</sup>	-	5,000E-04	-
	Partikel	g/MJ	-	-	8,000E-04	-
	Staub	g/MJ	4,920E-03 <sup>1)</sup>	-	-	-
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	2,000E-05	-	2,000E-03	-
	CO	g/MJ	7,000E-04	-	1,000E-03	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,200E-03	-	4,100E-03	-
	NMHC	g/MJ	6,350E-03 <sup>2)</sup>	-	2,700E-02	-
	Partikel	g/MJ	-	-	0,000E+00	-
	Staub	g/MJ	2,000E-05 <sup>1)</sup>	-	-	-

<sup>1)</sup> angegeben als Partikel      <sup>2)</sup> angegeben als HC      <sup>3)</sup> angegeben als PM<sub>10</sub>

Tab. 7-13c: Emissionsbilanzdaten für komprimiertes Erdgas

			-9-	-10-	-11-	-12-
			CNG	CNG	CNG	CNG 250 bar (2005)
			[58]	[58]	[92]	[162]
Quelle						
Qualität			o	o	o	--
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	2,600E-02	-	9,750E-03	8,333E-03
	CO	g/MJ	-	6,800E-02	6,500E-03	1,944E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,700E-02	3,000E-02	2,925E-02	1,667E-02
	NMHC	g/MJ	3,270E-02	2,600E-02	1,950E-02	2,778E-03
	Staub	g/MJ	-	-	-	2,778E-03

Tab. 7-14a: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für verflüssigtes Erdgas

		-1-	-2-	-3-	-4-	
		LNG (diese Arbeit)	LNG	NG - LNG	Fackelgas - LNG	
		[71], [76], [122], [164]	[95]	[288]	[288]	
		+++	++	++	++	
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	1,213E+00	1,250E+00	1,837E-01	-9,244E-01
	Erdöl	MJ/MJ	3,278E-03	-	1,768E-02	3,712E-02
	Erdgas	MJ/MJ	1,113E+00	-	-	-
	SK	MJ/MJ	2,389E-02	-	-	-
	BK	MJ/MJ	2,922E-02	-	-	-
	Uran	MJ/MJ	3,975E-02	-	-	-
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	2,746E-03	-	-	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	7,205E-04	-	1,788E-01	-9,313E-01
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	1,208E+01	1,460E+01	9,866E-03	-5,345E-02
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	1,539E-01	3,280E-01	1,053E-04	-2,622E-05
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	3,207E-04	-	2,351E-07	-9,249E-07

Tab. 7-14b: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für verflüssigtes Erdgas

			-5-
			LNG aus Afrika 2005
		Quelle	[162]
		Qualität	---
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	1,250E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	G/MJ	1,032E+01
	CH <sub>4</sub>	G/MJ	1,722E-01

Tab. 7-15a: Emissionsbilanzdaten für verflüssigtes Erdgas

			-1-	-2-	-3-	-4-
			LNG	LNG	NG - LNG	Fackelgas - LNG
			(diese Arbeit)			
		Quelle	[71], [76], [122], [164]	[95]	[288]	[288]
		Qualität	+++	++	++	++
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	2,153E-02	3,881E-02	1,966E-06	2,055E-06
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	8,616E-03	1,439E-02	2,702E-05	2,079E-06
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,069E-02	3,548E-02	6,337E-05	2,017E-05
	NMHC	g/MJ	2,700E-02	3,129E-02	8,356E-06	6,267E-06
	Partikel	g/MJ	1,595E-04	-	1,686E-06 <sup>1)</sup>	-2,154E-06 <sup>1)</sup>
	Staub	g/MJ	1,067E-03	3,310E-03	-	-
	HCl	g/MJ	3,370E-04	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,892E-06	-	-	-
	FormA	g/MJ	1,726E-05	-	-	-
	Benzol	g/MJ	6,224E-06	-	-	-
	BaP	ng/MJ	5,649E-01	-	-	-
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	6,742E-06	0,000E+00	3,106E-08	2,930E-08
	CO	g/MJ	1,245E-05	1,850E-03	1,315E-06	1,086E-06
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,334E-04	1,860E-03	1,866E-06	1,578E-06
	NMHC	g/MJ	1,075E-05	0,000E+00	5,930E-07	4,792E-07
	Partikel	g/MJ	2,968E-06	-	1,428E-07 <sup>1)</sup>	1,287E-07 <sup>1)</sup>
	Staub	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
	HCl	g/MJ	7,491E-09	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,498E-07	-	-	-
	FormA	g/MJ	1,722E-06	-	-	-
	Benzol	g/MJ	4,040E-07	-	-	-
	BaP	ng/MJ	5,782E-02	-	-	-
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,727E-02	9,510E-03	-	-
	CO	g/MJ	7,036E-03	3,640E-03	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,534E-02	9,820E-03	-	-
	NMHC	g/MJ	2,294E-02	5,990E-03	-	-
	Partikel	g/MJ	3,958E-05	-	-	-
	Staub	g/MJ	8,494E-04	1,210E-03	-	-
	HCl	g/MJ	3,356E-04	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,447E-06	-	-	-
	FormA	g/MJ	1,256E-05	-	-	-
	Benzol	g/MJ	5,115E-06	-	-	-
	BaP	ng/MJ	3,560E-01	-	-	-
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,262E-03	2,930E-02	-	-
	CO	g/MJ	1,568E-03	8,900E-03	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	5,220E-03	2,380E-02	-	-
	NMHC	g/MJ	4,046E-03	2,530E-02	-	-
	Partikel	g/MJ	1,169E-04	-	-	-
	Staub	g/MJ	2,180E-04	2,100E-03	-	-
	HCl	g/MJ	1,328E-06	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	2,952E-07	-	-	-
	FormA	g/MJ	2,981E-06	-	-	-
	Benzol	g/MJ	7,051E-07	-	-	-
	BaP	ng/MJ	1,511E-01	-	-	-

<sup>1)</sup> angegeben als PM<sub>10</sub>

Tab. 7-15b: Emissionsbilanzdaten für verflüssigtes Erdgas

			-5- LNG aus Afrika 2005
			Quelle
			Qualität
OK	CO	g/MJ	1,389E-02
I+II+III	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,667E-02
	NMHC	g/MJ	2,778E-03

Tab. 7-16a: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für komprimierten Wasserstoff

			-1- NG-CGH <sub>2</sub> – zentral (diese Arbeit)	-2- NG-CGH <sub>2</sub> - dezentral (diese Arbeit)	-3- NG-CGH <sub>2</sub>	-4- NG-CGH <sub>2</sub>
			Quelle	Quelle	Quelle	Quelle
			Qualität	Qualität	Qualität	Qualität
Primär- energie	Summe	MJ/MJ	1,604E+00	1,825E+00	1,580E+00	1,529E+00
	Erdöl	MJ/MJ	5,770E-04	3,207E-03	-	-
	Erdgas	MJ/MJ	1,567E+00	1,617E+00	-	-
	SK	MJ/MJ	9,134E-03	5,077E-02	-	-
	BK	MJ/MJ	1,117E-02	6,210E-02	-	-
	Uran	MJ/MJ	1,520E-02	8,450E-02	-	-
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	1,050E-03	5,836E-03	-	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	2,755E-04	1,531E-03	-	-
Global	CO <sub>2</sub>	G/MJ	9,015E+01	1,010E+02	9,238E+01	8,852E+01
	CH <sub>4</sub>	G/MJ	2,226E-01	3,516E-01	2,954E-01	-
	N <sub>2</sub> O	G/MJ	2,058E-04	5,965E-04	-	-

Tab. 7-16b: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für komprimierten Wasserstoff

			-5- NG - CGH <sub>2</sub> zentral	-6- NG - CGH <sub>2</sub> dezentral	-7- Solar - CGH <sub>2</sub>	-8- NG-CGH <sub>2</sub>
			Quelle	Quelle	Quelle	Quelle
			Qualität	Qualität	Qualität	Qualität
Primär- energie	Summe	MJ/MJ	6,386E-01	9,021E-01	4,222E-01	1,550E+00
	Erdöl	MJ/MJ	7,633E-03	1,070E-01	6,697E-03	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	5,231E-01	8,031E-01	3,091E-01	-
Global	CO <sub>2</sub>	g/MJ	9,196E-02	1,066E-01	2,466E-02	8,850E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	4,859E-05	6,921E-05	4,956E-05	3,000E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	2,824E-07	5,815E-07	2,511E-07	-

Tab. 7-16c: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für komprimierten Wasserstoff

			-9- NG-CGH <sub>2</sub>	-10- Strommix-D-Elyse- CGH <sub>2</sub>	-11- Strommix D-Elyse - CGH <sub>2</sub> 2005	-12- Wasserkraft-HGÜ- Elyse-CGH <sub>2</sub>
			Quelle	Quelle	Quelle	Quelle
			Qualität	Qualität	Qualität	Qualität
Primär- energie	Summe	MJ/MJ	1,754E+00	4,300E+00	3,450E+00	2,210E+00
	Erdöl	MJ/MJ	2,400E-02	-	-	1,000E-02
	Erdgas	MJ/MJ	1,643E+00	-	-	1,100E-02
	SK	MJ/MJ	1,800E-02	-	-	2,500E-02
	BK	MJ/MJ	3,400E-02	-	-	3,000E-02
	Uran	MJ/MJ	3,200E-02	-	-	3,100E-02
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	3,000E-03	-	-	2,103E+00
	Global	CO <sub>2</sub>	g/MJ	9,474E+01	1,773E+02	2,147E+02
CH <sub>4</sub>		g/MJ	2,320E-01	1,900E-01	4,528E-01	1,430E-02
N <sub>2</sub> O		g/MJ	2,800E-04	-	-	1,140E-03

Tab. 7-16d: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für komprimierten Wasserstoff

			-13- Wasserkraft-Elyse- CGH <sub>2</sub> 2005	-14- Windkraft-Elyse- CGH <sub>2</sub> 2005	-15- PV- Elyse-CGH <sub>2</sub> 2005	-16- NG-Strommix D- Kvaerner-CGH <sub>2</sub> 2005
			[162]	[162]	[162]	[162]
			+	+	+	--
			Quelle	Quelle	Quelle	Quelle
			Qualität	Qualität	Qualität	Qualität
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	1,400E+00	1,460E+00	1,690E+00	2,900E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	3,172E+00	5,592E+00	2,524E+01	7,556E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	8,333E-03	1,667E-02	5,833E-02	5,611E-01

Tab. 7-16e: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für komprimierten Wasserstoff

			-17- NG-Wasser-kraft- Kvaerner-CGH <sub>2</sub> 2005	-18- Biomassefarming- CGH <sub>2</sub> 2005	-19- Holzvergasung- CGH <sub>2</sub>	-20- Holz - CGH <sub>2</sub> 300 bar 2005
			[162]	[162]	[77]	[162]
			o	--	++	--
			Quelle	Quelle	Quelle	Quelle
			Qualität	Qualität	Qualität	Qualität
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	2,220E+00	1,410E+00	2,840E-01	1,910E+00
	Erdöl	MJ/MJ	-	-	4,800E-02	-
	Erdgas	MJ/MJ	-	-	2,900E-02	-
	SK	MJ/MJ	-	-	4,100E-02	-
	BK	MJ/MJ	-	-	8,200E-02	-
	Uran	MJ/MJ	-	-	7,700E-02	-
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	-	-	7,000E-03	-
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	6,594E+00	3,219E+00	1,755E+01	2,040E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	4,167E-01	2,778E-03	3,170E+01	3,056E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	-	-	9,900E-01	-

Tab. 7-17a: Emissionsbilanzdaten für komprimierten Wasserstoff

			-1-	-2-	-3-	-4-
			NG-CGH <sub>2</sub> – zentral (diese Arbeit)	NG-CGH <sub>2</sub> - dezentral	NG-CGH <sub>2</sub>	NG-CGH <sub>2</sub>
Quelle			[71], [122], [164]	[164]	[95]	[85]
Qualität			+++	+++	++	+
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	2,485E-02	3,469E-02	-	6,489E-02
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	3,223E-02	2,220E-02	2,380E-02	2,738E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	5,835E-02	6,292E-02	4,871E-02	4,171E-02 <sup>1)</sup>
	NMHC	g/MJ	3,771E-02	4,961E-02	3,357E-02	5,124E-02
	Partikel	g/MJ	5,417E-05	3,011E-04	-	-
	Staub	g/MJ	1,235E-03	1,732E-03	-	9,390E-03 <sup>2)</sup>
	HCl	g/MJ	1,288E-04	7,159E-04	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,063E-06	1,997E-06	-	-
	FormA	g/MJ	3,220E-06	1,790E-05	-	-
	Benzol	g/MJ	2,443E-06	8,118E-06	-	-
	BaP	ng/MJ	1,057E-01	5,653E-01	-	-
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	0,000E+00
	CO	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	1,071E-02	0,000E+00
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	1,025E-02	0,000E+00
	NMHC	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	2,160E-03	0,000E+00
	Partikel	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
	Staub	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	0,000E+00
	HCl	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
	FormA	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
	Benzol	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
	BaP	ng/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	2,006E-02	2,795E-02	1,157E-02	6,486E-02
	CO	g/MJ	3,015E-02	1,993E-02	4,190E-03	2,647E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	5,226E-02	5,453E-02	1,466E-02	4,015E-02
	NMHC	g/MJ	3,205E-02	4,361E-02	6,110E-03	4,345E-02 <sup>1)</sup>
	Partikel	g/MJ	9,819E-06	5,458E-05	-	-
	Staub	g/MJ	9,284E-04	1,413E-03	5,000E-04	9,360E-03 <sup>2)</sup>
	HCl	g/MJ	1,283E-04	7,131E-04	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	9,516E-07	1,378E-06	-	-
	FormA	g/MJ	2,094E-06	1,164E-05	-	-
	Benzol	g/MJ	2,178E-06	6,645E-06	-	-
	BaP	ng/MJ	4,855E-02	2,475E-01	-	-
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,790E-03	6,732E-03	2,930E-02	3,000E-05
	CO	g/MJ	2,072E-03	2,273E-03	8,900E-03	9,100E-04
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	6,091E-03	8,392E-03	2,380E-02	1,560E-03
	NMHC	g/MJ	5,659E-03	5,994E-03	2,530E-02	7,790E-03 <sup>1)</sup>
	Partikel	g/MJ	4,435E-05	2,465E-04	-	-
	Staub	g/MJ	3,068E-04	3,192E-04	2,100E-03	3,000E-05 <sup>2)</sup>
	HCl	g/MJ	5,011E-07	2,786E-06	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,114E-07	6,192E-07	-	-
	FormA	g/MJ	1,126E-06	6,259E-06	-	-
	Benzol	g/MJ	2,650E-07	1,473E-06	-	-
	BaP	ng/MJ	5,717E-02	3,178E-01	-	-

<sup>1)</sup> angegeben als HC-Emission<sup>2)</sup> angegeben als Partikelemission

Tab. 7-17b: Emissionsbilanzdaten für komprimierten Wasserstoff

			-5-	-6-	-7-	-8-
			NG - CGH2 zentral	NG - CGH2 dezentral	Solar - CGH2	NG-CGH2
Quelle			[288]	[288]	[288]	[75]
Qualität			++	++	++	++
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	5,778E-05	5,212E-05	5,735E-05	-
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	4,357E-05	6,093E-05	1,904E-05	1,000E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	9,440E-05	1,156E-04	7,891E-05	4,600E-02
	NMHC	g/MJ	6,502E-06	9,150E-06	5,238E-06	2,000E-02
	Partikel	g/MJ	4,046E-06 <sup>1)</sup>	4,848E-06 <sup>1)</sup>	3,916E-06 <sup>1)</sup>	-
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,235E-07	1,365E-07	1,222E-07	-
	CO	g/MJ	2,596E-06	4,905E-05	2,608E-06	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	6,960E-06	6,519E-05	6,993E-06	-
	NMHC	g/MJ	6,500E-07	6,414E-06	6,522E-07	-
	Partikel	g/MJ	1,460E-07 <sup>1)</sup>	1,614E-06 <sup>1)</sup>	1,461E-07 <sup>1)</sup>	-

<sup>1)</sup> angegeben als PM<sub>10</sub>

Tab. 7-17c: Emissionsbilanzdaten für komprimierten Wasserstoff

			-9-	-10-	-11-	-12-
			NG-CGH2	Strommix-D-Elyse-CGH2	Strommix D-Elyse - CGH2 2005	Wasserkraft-HGÜ-Elyse-CGH <sub>2</sub>
Quelle			[77]	[75]	[162]	[77]
Qualität			++	++	-	++
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	3,300E-02	-	1,167E-01	2,000E-02
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	3,100E-02	5,000E-02	2,250E-01	1,300E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	6,100E-02	1,800E-01	3,167E-01	1,200E-02
	NMHC	g/MJ	7,100E-02	1,600E-02	3,333E-02	2,000E-03
	Partikel	g/MJ	1,800E-04	-	-	6,100E-04
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	4,000E-03	-	2,500E-02	1,000E-03
	Partikel	g/MJ	8,700E-06	-	-	1,100E-05
	HCl	g/MJ	2,500E-05	-	-	1,800E-05
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	7,400E-08	-	-	2,000E-07
	FormA	g/MJ	3,300E-02	-	1,167E-01	2,000E-02
	Benzol	g/MJ	3,100E-02	5,000E-02	2,250E-01	1,300E-02
	BaP	ng/MJ	6,100E-02	1,800E-01	3,167E-01	1,200E-02

Tab. 7-17d: Emissionsbilanzdaten für komprimierten Wasserstoff

			-13-	-14-	-15-	-16-
			Wasserkraft-Elyse-CGH <sub>2</sub> (2005)	Windkraft-Elyse-CGH <sub>2</sub> (2005)	PV-Elyse-CGH <sub>2</sub> (2005)	NG-Strommix D-Kvaerner-CGH <sub>2</sub> (2005)
Quelle			[162]	[162]	[162]	[162]
Qualität			+	+	+	--
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	2,778E-03	1,667E-02	4,167E-02	4,722E-02
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	8,333E-03	5,278E-02	1,250E-01	1,000E-01
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	8,333E-03	1,667E-02	7,222E-02	1,250E-01
	NMHC	g/MJ	0,000E+00	2,778E-03	5,556E-03	1,389E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,778E-03	2,778E-03	1,667E-02	1,111E-02
	FormA	g/MJ	2,778E-03	1,667E-02	4,167E-02	4,722E-02
	Benzol	g/MJ	8,333E-03	5,278E-02	1,250E-01	1,000E-01
	BaP	ng/MJ	8,333E-03	1,667E-02	7,222E-02	1,250E-01

Tab. 7-17d: Emissionsbilanzdaten für komprimierten Wasserstoff

			-17-	-18-	-19-	-20-
			NG-Wasser-kraft- Kvaerner-CGH <sub>2</sub> 2005	Biomassefarming- CGH <sub>2</sub> 2005	Holzvergasung- CGH <sub>2</sub>	Holz-CGH <sub>2</sub> 300 bar 2005
Quelle			[162]	[162]	[77]	[162]
Qualität			o	--	++	--
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,111E-02	5,556E-03	2,400E-02	1,944E-02
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	3,056E-02	5,556E-03	2,800E-02	4,444E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,500E-02	5,000E-02	5,600E-02	2,000E-01
	NMHC	g/MJ	2,778E-03	2,778E-03	2,000E-02	3,333E-02
	Partikel	g/MJ	-	-	5,200E-04	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,778E-03	0,000E+00	4,000E-04	8,333E-03
	Partikel	g/MJ	-	-	6,700E-04	-
	HCl	g/MJ	-	-	6,200E-05	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-	-	1,400E-07	-
	FormA	g/MJ	1,111E-02	5,556E-03	2,400E-02	1,944E-02
	Benzol	g/MJ	3,056E-02	5,556E-03	2,800E-02	4,444E-02
	BaP	ng/MJ	2,500E-02	5,000E-02	5,600E-02	2,000E-01

Tab. 7-18a: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für verflüssigten Wasserstoff

			-1-	-2-	-3-	-4-
			NG-LH <sub>2</sub> (diese Arbeit)	Strom(erneuerbar)- Elyse- LH <sub>2</sub> (diese Arbeit)	Strom(Erdgas)- Elyse-LH <sub>2</sub>	Wasserkraft-Elyse- See-transport <sup>1)</sup> -LH <sub>2</sub>
Quelle			[71], [122], [164]	[71], [122], [164]	[86]	[86]
Qualität			++	++	+	+
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	2,647E+00	2,013E+00	5,810E+00	3,650E+00
	Erdöl	MJ/MJ	3,090E-02	2,135E-02	-	-
	Erdgas	MJ/MJ	1,739E+00	4,768E-04	-	-
	SK	MJ/MJ	2,175E-01	5,959E-04	-	-
	BK	MJ/MJ	2,659E-01	7,021E-04	-	-
	Uran	MJ/MJ	3,619E-01	9,546E-04	-	-
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	2,499E-02	1,989E+00	-	1,700E-01
	Sonst. ET	MJ/MJ	6,559E-03	1,730E-05	-	3,480E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	1,491E+02	1,762E+00	2,629E+02	5,400E+00
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	3,294E-01	5,341E-04	1,000E-04	1,000E-04
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	2,279E-03	1,485E-04	3,000E-04	3,000E-04

<sup>1)</sup> Seetransport unter Berücksichtigung von C-Bunkeröl zum Schiffsbetrieb

Tab. 7-18b: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für verflüssigten Wasserstoff

			-5-	-6-	-7-	-8-
			REG-Algerien -LH <sub>2</sub>	REG-Kanada-LH <sub>2</sub>	NG - LH <sub>2</sub>	Fackelgas - LH <sub>2</sub>
Quelle			[185]	[185]	[288]	[288]
Qualität			++	++	++	++
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	2,506E+00	2,024E+00	1,516E+00	-3,551E-01
	Erdöl	MJ/MJ	-	-	2,287E-02	2,381E-02
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	1,322E+00	1,312E+00	-	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	1,183E+00	7,120E-01	1,442E+00	-3,982E-01
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	7,752E+01	4,368E+01	1,385E-01	3,386E-02
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	1,578E-01	4,392E-02	3,586E-05	-5,778E-05
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	2,987E-03	1,997E-04	1,423E-06	-6,178E-07

Tab. 7-18c: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für verflüssigten Wasserstoff

			-9-	-10-	-11-	-12-
			Solar-LH <sub>2</sub>	NG-LH <sub>2</sub>	Strommix-D-Elyse-LH <sub>2</sub>	Strommix-LH <sub>2</sub> (2005)
Quelle			[288]	[75]	[75]	[162]
Qualität			++	o	o	--
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	6,010E-02	2,050E+00	5,900E+00	4,470E+00
	Erdöl	MJ/MJ	4,511E-02	-	-	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	5,908E-02	-	-	-
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	2,284E-03	1,306E+02	2,760E+02	2,783E+02
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	2,540E-06	3,000E-02	2,800E-01	5,861E-01
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	5,270E-08	-	-	-

<sup>1)</sup> ohne Leckage und Fackelverluste

Tab. 7-18d: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für verflüssigten Wasserstoff

			-13-	-14-	-15-	-16-
			Wasserkraft-Elyse-LH <sub>2</sub> aus Kanada	PV-Elyser-LH <sub>2</sub> aus Afrika	Solarthermie+Erd- ölgas-Elyse-LH <sub>2</sub> aus Afrika	NG-Wasser-kraft- Kvaerner-LH <sub>2</sub> - Norwegen
Quelle			[162]	[162]	[162]	[162]
Qualität			--	--	--	--
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	1,980E+00	1,880E+00	2,450E+00	2,560E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	7,547E+00	6,653E+00	4,010E+01	3,344E+00
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	1,944E-02	1,944E-02	1,028E-01	8,889E-02

Tab. 7-19a: Emissionsbilanzdaten für verflüssigten Wasserstoff

+			-1-	-2-	-3-	-4-
			NG-LH <sub>2</sub> (diese Arbeit)	Strom(erneuerbar)- Elyse- LH <sub>2</sub> (diese Arbeit)	Strom(Erdgas)- Elyse-LH <sub>2</sub>	Wasserkraft-Elyse- See-transport <sup>1)</sup> -LH <sub>2</sub>
Quelle			[71], [122], [164]	[71], [122], [164]	[86]	[86]
Qualität			++	++	+	+
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	7,358E-02	8,734E-03	1,900E-03	4,000E-02
	CO	g/MJ	5,002E-02	1,111E-03	2,800E-03	4,400E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,265E-01	1,025E-02	1,770E-01	1,200E-01
	NMHC	g/MJ	1,462E-03	4,628E-04	-	-
	Partikel	g/MJ	3,630E-03	2,748E-05	-	-
	Staub	g/MJ	3,068E-03	1,831E-05	-	-
	HCl	g/MJ	1,304E-05	9,322E-06	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,625E-04	9,507E-05	-	-
	FormA	g/MJ	5,142E-05	2,315E-05	-	-
	Benzol	g/MJ	5,296E+00	3,335E+00	-	-
	BaP	ng/MJ	6,544E-05	6,546E-05	0,000E+00	0,000E+00
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,208E-04	1,209E-04	2,800E-03	2,800E-03
	CO	g/MJ	1,295E-03	1,296E-03	4,000E-02	4,000E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,043E-04	1,043E-04	1,400E-03	1,400E-03
	NMHC	g/MJ	2,880E-05	2,881E-05	-	-
	Partikel	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
	Staub	g/MJ	7,271E-08	7,273E-08	-	-
	HCl	g/MJ	1,454E-06	1,455E-06	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,672E-05	1,672E-05	-	-
	FormA	g/MJ	3,921E-06	3,922E-06	-	-
	Benzol	g/MJ	5,612E-01	5,614E-01	-	-
	BaP	ng/MJ	5,798E-02	2,854E-03	1,900E-03	0,000E+00
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,646E-02	7,159E-04	0,000E+00	0,000E+00
	CO	g/MJ	1,079E-01	6,492E-03	1,370E-01	0,000E+00
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,750E-02	7,217E-04	0,000E+00	0,000E+00
	NMHC	g/MJ	3,686E-04	1,403E-04	-	-
	Partikel	g/MJ	3,289E-03	2,674E-05	-	-
	Staub	g/MJ	3,055E-03	1,167E-05	-	-
	HCl	g/MJ	8,895E-06	6,407E-06	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,186E-04	7,149E-05	-	-
	FormA	g/MJ	4,107E-05	1,774E-05	-	-
	Benzol	g/MJ	3,358E+00	2,334E+00	-	-
	BaP	ng/MJ	1,553E-02	5,814E-03	0,000E+00	4,000E-02
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	3,443E-03	2,744E-04	0,000E+00	1,600E-03
	CO	g/MJ	1,738E-02	2,460E-03	0,000E+00	8,000E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	6,587E-03	8,166E-05	0,000E+00	4,000E-03
	NMHC	g/MJ	1,065E-03	2,937E-04	-	-
	Partikel	g/MJ	3,406E-04	7,319E-07	-	-
	Staub	g/MJ	1,209E-05	6,567E-06	-	-
	HCl	g/MJ	2,690E-06	1,461E-06	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	2,715E-05	6,854E-06	-	-
	FormA	g/MJ	6,426E-06	1,493E-06	-	-
	Benzol	g/MJ	1,376E+00	4,394E-01	-	-
	BaP	ng/MJ	7,358E-02	8,734E-03	1,900E-03	4,000E-02

<sup>1)</sup> Seetransport unter Berücksichtigung von C-Bunkeröl zum Schiffsbetrieb

Tab. 7-19b: Emissionsbilanzdaten für verflüssigten Wasserstoff

			-5-	-6-	-7-	-8-
			REG-Algerien -LH <sub>2</sub>	REG-Kanada-LH <sub>2</sub>	NG - LH <sub>2</sub>	Fackelgas - LH <sub>2</sub>
Quelle			[185]	[185]	[288]	[288]
Qualität			++	++	++	++
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,435E-02	1,040E-02	4,935E-06	4,756E-06
	CO	g/MJ	1,402E-01	6,880E-02	5,674E-05	5,467E-06
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,206E-01	1,333E-01	9,010E-05	-2,556E-06
	NMHC	g/MJ	6,639E-03	6,861E-03	7,339E-06	9,790E-07
	Partikel	g/MJ	-	-	5,483E-06 <sup>1)</sup>	-1,776E-06 <sup>1)</sup>
	Staub	g/MJ	2,165E-02	3,391E-03	-	-
	HCl	g/MJ	1,093E-03	4,799E-05	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	2,094E-06	1,819E-06	-	-
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	3,101E-04	3,080E-04	2,812E-08	2,817E-08
	CO	g/MJ	6,832E-04	6,785E-04	8,045E-07	8,047E-07
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,836E-03	2,817E-03	1,607E-06	1,608E-06
	NMHC	g/MJ	3,953E-04	3,926E-04	4,215E-07	4,216E-07
	Partikel	g/MJ	-	-	1,433E-07 <sup>1)</sup>	1,433E-07 <sup>1)</sup>
	Staub	g/MJ	1,471E-04	1,461E-04	-	-
	HCl	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,721E-06	1,709E-06	-	-
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,763E-02	1,047E-03	-	-
	CO	g/MJ	7,638E-02	9,459E-03	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,632E-02	8,186E-03	-	-
	NMHC	g/MJ	1,999E-03	2,664E-04	-	-
	Staub	g/MJ	1,003E-02	1,709E-03	-	-
	HCl	g/MJ	5,813E-04	2,279E-05	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	3,737E-07	1,101E-07	-	-
	<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	2,640E-02	9,048E-03	-
CO		g/MJ	6,309E-02	5,866E-02	-	-
NO <sub>x</sub>		g/MJ	1,814E-01	1,223E-01	-	-
NMHC		g/MJ	4,245E-03	6,202E-03	-	-
Staub		g/MJ	1,148E-02	1,536E-03	-	-
HCl		g/MJ	5,114E-04	2,520E-05	-	-
NH <sub>3</sub>		g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-

<sup>1)</sup> angegeben als PM<sub>10</sub>

Tab. 7-19c: Emissionsbilanzdaten für verflüssigten Wasserstoff

			-9-	-10-	-11-	-12-
			Solar-LH <sub>2</sub>	NG-LH <sub>2</sub>	Strommix-D-Elyse-LH <sub>2</sub>	Strommix-LH <sub>2</sub> (2005)
Quelle			[288]	[75]	[75]	[162]
Qualität			++	o	o	--
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	7,096E-07	-	-	1,500E-01
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	1,039E-05	1,500E-02	7,000E-02	2,917E-01
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,799E-05	7,300E-02	2,700E-01	4,111E-01
	NMHC	g/MJ	4,666E-06	3,000E-02	2,400E-02	4,167E-02
	Partikel	g/MJ	1,670E-06 <sup>1)</sup>	-	-	-
	Staub	g/MJ	-	-	-	3,333E-02
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	6,434E-08	-	-	-
	CO	g/MJ	1,995E-06	-	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,500E-06	-	-	-
	NMHC	g/MJ	9,303E-07	-	-	-
	Partikel	g/MJ	3,239E-07 <sup>1)</sup>	-	-	-

<sup>1)</sup> angegeben als PM<sub>10</sub>

Tab. 7-19d: Emissionsbilanzdaten für verflüssigten Wasserstoff

			-13-	-14-	-15-	-16-
			Wasserkraft-Elyse-LH <sub>2</sub> aus Kanada	PV-Elyser-LH <sub>2</sub> aus Afrika	Solarthermie+Erd-ölgas-Elyse-LH <sub>2</sub> aus Afrika	NG-Wasserkraft-Kvaerner-LH <sub>2</sub> -Norwegen
Quelle			[162]	[162]	[162]	[162]
Qualität			--	--	--	--
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,111E-02	1,111E-02	2,222E-02	2,778E-03
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	1,389E-02	2,222E-02	2,222E-02	8,333E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,944E-02	1,944E-02	4,444E-02	1,111E-02
	NMHC	g/MJ	2,778E-03	2,778E-03	2,778E-03	0,000E+00
	Staub	g/MJ	2,778E-03	5,556E-03	0,000E+00	2,778E-03

Tab. 7-20a: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Methanol

			-1-	-2-	-3-	-4-
			NG-MeOH (diese Arbeit)	BioMeOH (diese Arbeit)	NG(GUS)-MeOH <sup>1)</sup>	NG(GUS)-MeOH <sup>2)</sup>
Quelle			[71], [76], [122]	[71], [76], [122]	[76]	[76]
Qualität			+++	+++	+++	+++
<b>Primär-energie</b>	Summe	MJ/MJ	1,676E+00	1,769E-01	1,708E+00	1,726E+00
	Erdöl	MJ/MJ	3,850E-02	3,236E-02	4,600E-02	5,700E-02
	Erdgas	MJ/MJ	1,610E+00	4,157E-02	1,632E+00	1,633E+00
	SK	MJ/MJ	1,100E-02	3,269E-02	1,200E-02	1,500E-02
	BK	MJ/MJ	6,000E-03	3,566E-02	6,000E-03	7,000E-03
	Uran	MJ/MJ	1,000E-02	3,467E-02	1,100E-02	1,300E-02
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	7,500E-04	0,000E+00	1,000E-03	1,000E-03
	Sonst. ET	MJ/MJ	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	2,457E+01 <sup>3)</sup>	-5,818E+01	2,597E+01	2,678E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	1,371E-01	1,043E-01	2,137E-01	2,162E-01
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	3,100E-04	3,109E-03	3,800E-04	4,000E-04

<sup>1)2)</sup> ohne Infrastruktur, ohne Betankungsemission<sup>3)</sup> direkte CO<sub>2</sub>-Emission der Verbrennung ist im Wert nicht berücksichtigt

Tab. 7-20b: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Methanol

			-5- NG-MeOH	-6- NG(Norwegen)- MeOH <sup>1)</sup>	-7- NG-MeOH <sup>2)</sup>	-8- NG-MeOH
			[185]	[192], [76]	[86]	[85]
			Quelle			
			Qualität	o	+++	+
Primär- Energie	Summe	MJ/MJ	2,420E+00	1,662E+00	1,450E+00	1,539E+00
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	1,361E-04	1,000E-03	-	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	2,419E+00	-	-	-
Global	CO <sub>2</sub>	g/MJ	9,887E+01	2,399E+01	1,080E+01	1,614E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	4,730E-01	6,300E-02	1,340E-01	-
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	1,494E-03	2,600E-04	0,000E+00	-

<sup>1)</sup> mit Infrastruktur, mit Betankungsemission      <sup>2)</sup> ohne Seetransport von Methanol

Tab. 7-20c: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Methanol

			-9- NG-MeOH	-10- NG – MeOH	-11- Holz-MeOH	-12- Salixweidenkultur- MeOH
			[95]	[288]	[192]	[86]
			Quelle			
			Qualität	++	+++	+
Primär- energie	Summe	MJ/MJ	1,710E+00	5,498E-01	3,358E+00	1,800E-01
	Erdöl	MJ/MJ	-	3,122E-02	-	-
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	-	-	3,150E+00 <sup>1)</sup>	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	-	5,458E-01	-	-
Global	CO <sub>2</sub>	g/MJ	2,703E+01	1,796E-02	-6,011E+01 <sup>2)</sup>	1,390E+01 <sup>3)</sup>
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	2,920E-01	2,949E-05	1,062E-01	1,330E-01
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	-	2,493E-07	3,310E-03	3,000E-04

<sup>1)</sup> Der Gesamtwirkungsgrad der Anlage beträgt 53%. Durch Allokation werden 64% des Holz Inputs dem Methanol zugewiesen.  
<sup>2)</sup> Für das Methanol aus regenerativen Quellen ist eine CO<sub>2</sub>-Emission von 69,1 g/MJ berücksichtigt, damit die Werte vergleichbar sind, d.h. die CO<sub>2</sub>-Emission der Verbrennung muss noch mitberechnet werden.  
<sup>3)</sup> Nicht berücksichtigt sind 90g/MJ für die Umwandlung aus Biomasse

Tab. 7-20d: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Methanol

			-13- Deponiegas- MeOH	-14- Fackelgas-MeOH	-15- NG-MeOH	-16- NG-MeOH
			[288]	[288]	[75]	[40]
			Quelle			
			Qualität	++	++	++
Primär- energie	Summe	MJ/MJ	3,975E-01	-9,572E-01	1,640E+00	-
	Erdöl	MJ/MJ	2,882E-02	3,147E-02	-	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	3,975E-01	-9,607E-01	-	-
Global	CO <sub>2</sub>	g/MJ	-1,455E-01	-6,536E-02	2,550E+01	1,174E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	-6,363E-04	-6,663E-05	1,650E-01	1,348E-01
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	2,066E-07	-1,286E-06	1,300E-02	9,130E-04

Tab. 7-20e: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Methanol

			-17- Biomasse-MeOH Minimal	-18- Biomasse-MeOH Maximal	-19- Holz-MeOH	-20- SK-MeOH (2005)
			[58]	[58]	[75]	[162]
			Quelle			
			Qualität	o	++	-
Primär- energie	Summe	MJ/MJ	-	-	-	2,160E+00
	SK	MJ/MJ	-	-	-	2,160E+00
Global	CO <sub>2</sub>	g/MJ	1,381E+01	6,793E+01	-4,730E+01 <sup>1)</sup>	1,040E+02
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	4,600E-02	1,330E-01	2,000E-02	7,389E-01
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	2,000E-02	-

<sup>1)</sup> Unter Berücksichtigung einer Regenerierung der Holzplantage

Tab. 7-20f: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Methanol

			-21-	-22-	-23-
			Holz-MeOH (2005)	NG-MeOH (2005)	PV-Elyse-H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> -Absorption-MeOH aus Afrika (2005)
Quelle			[162]	[162]	[162]
Qualität			--	--	--
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	3,070E+00	1,610E+00	2,240E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	1,986E+01	2,045E+01	7,311E+00
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	2,778E-02	3,750E-01	1,389E-02

Tab. 7-21a: Emissionsbilanzdaten für Methanol

			-1-	-2-	-3-	-4-
			NG-MeOH (diese Arbeit)	BioMeOH (diese Arbeit)	NG(GUS)-MeOH <sup>1)</sup>	NG(GUS)-MeOH <sup>2)</sup>
Quelle			[71], [76], [122]	[71], [76], [122]	[76]	[76]
Qualität			+++	+++	+++	+++
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	5,250E-02	3,196E-02	7,700E-02	8,200E-02
	CO	g/MJ	2,450E-02	4,185E-01	2,800E-02	2,800E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	7,250E-02	3,630E-01	8,700E-02	9,000E-02
	NMHC	g/MJ	4,845E-02	2,287E-01	6,400E-02	7,000E-02
	Partikel	g/MJ	2,100E-03	1,200E-04	2,900E-03	2,900E-03
	Staub	g/MJ	3,350E-03	4,755E-02	3,900E-03	5,200E-03
	HCl	g/MJ	7,647E-08	7,647E-08	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	2,500E-05	2,182E-03	2,800E-05	3,100E-05
	FormA	g/MJ	1,758E-05	1,758E-05	-	-
	Benzol	g/MJ	3,150E-05	7,695E-05	4,000E-05	7,400E-05
	BaP	ng/MJ	2,750E+01	6,210E+01	3,400E+01	6,800E+01
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	6,882E-05	6,882E-05	0,000E+00	0,000E+00
	CO	g/MJ	1,271E-04	1,271E-04	0,000E+00	0,000E+00
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,362E-03	1,362E-03	0,000E+00	0,000E+00
	NMHC	g/MJ	1,237E-03	1,237E-03	0,000E+00	0,000E+00
	Partikel	g/MJ	3,029E-05	3,029E-05	0,000E+00	0,000E+00
	Staub	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	HCl	g/MJ	7,647E-08	7,647E-08	0,000E+00	0,000E+00
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,529E-06	1,529E-06	0,000E+00	0,000E+00
	FormA	g/MJ	1,758E-05	1,758E-05	0,000E+00	0,000E+00
	Benzol	g/MJ	4,124E-06	4,124E-06	0,000E+00	0,000E+00
	BaP	ng/MJ	5,902E-01	5,902E-01	0,000E+00	0,000E+00
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	3,028E-02	3,157E-02	5,005E-02	5,494E-02
	CO	g/MJ	1,832E-02	4,141E-01	2,492E-02	2,492E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	4,402E-02	3,580E-01	5,829E-02	6,120E-02
	NMHC	g/MJ	3,758E-02	2,252E-01	6,336E-02	6,930E-02
	Partikel	g/MJ	1,622E-04	8,851E-05	2,030E-04	1,740E-04
	Staub	g/MJ	2,454E-03	4,707E-02	3,900E-03	5,200E-03
	HCl	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,813E-05	2,158E-03	2,128E-05	2,418E-05
	FormA	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
	Benzol	g/MJ	1,515E-05	7,205E-05	2,360E-05	5,772E-05
	BaP	ng/MJ	2,502E+01	6,089E+01	3,128E+01	6,528E+01
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	2,216E-02	3,196E-04	2,695E-02	2,706E-02
	CO	g/MJ	6,055E-03	4,185E-03	3,080E-03	3,080E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,712E-02	3,630E-03	2,871E-02	2,880E-02
	NMHC	g/MJ	9,635E-03	2,237E-03	6,400E-04	7,000E-04
	Partikel	g/MJ	1,908E-03	1,200E-06	2,697E-03	2,726E-03
	Staub	g/MJ	8,960E-04	4,755E-04	0,000E+00 <sup>3)</sup>	0,000E+00 <sup>3)</sup>
	HCl	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	5,340E-06	2,182E-05	6,720E-06	6,820E-06
	FormA	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	Benzol	g/MJ	1,223E-05	7,695E-07	1,640E-05	1,628E-05
	BaP	ng/MJ	1,885E+00	6,210E-01	2,720E+00	2,720E+00

<sup>1)</sup> ohne Infrastruktur, ohne Betankungsemission

<sup>2)</sup> mit Infrastruktur, ohne Betankungsemission

<sup>3)</sup> Anteil der OK ist mit 0% ausgewiesen.

Tab. 7-21b: Emissionsbilanzdaten für Methanol

			-5-	-6-	-7-	-8-
			NG-MeOH <sup>1)</sup>	NG(Norwegen)- MeOH <sup>2)</sup>	NG-MeOH <sup>3)</sup>	NG-MeOH
Quelle			[185]	[192], [76]	[86]	[85]
Qualität			o	+++	+	+
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	[0,000E+00]	3,300E-02	0,000E+00	4,400E-04
	CO	g/MJ	9,910E-04	2,200E-02	2,500E-02	9,240E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,075E-01	6,100E-02	1,280E-01	4,092E-02
	NMHC	g/MJ	[0,000E+00]	3,300E-02	2,600E-02	1,664E-02
	Partikel	g/MJ	-	1,300E-03	-	-
	Staub	g/MJ	[0,000E+00]	4,100E-03	-	2,280E-03
	HCl	g/MJ	5,703E-04	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,882E-06	2,400E-05	-	-
	Benzol	g/MJ	-	5,700E-05	-	-
BaP	ng/MJ	-	5,600E+01	-	-	
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	2,332E-04	0,000E+00	0,000E+00	3,900E-04
	CO	g/MJ	[0,000E+00]	0,000E+00	0,000E+00	7,750E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,069E-03	0,000E+00	1,000E-02	3,123E-02
	NMHC	g/MJ	1,909E-04	0,000E+00	4,000E-03	6,710E-03
	Partikel	g/MJ	-	0,000E+00	-	-
	Staub	g/MJ	1,106E-04	0,000E+00	-	2,240E-03
	HCl	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,294E-06	0,000E+00	-	-
	Benzol	g/MJ	-	0,000E+00	-	-
BaP	ng/MJ	-	0,000E+00	-	-	
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,345E-02	1,584E-02	0,000E+00	2,000E-05
	CO	g/MJ	1,940E-02	1,276E-02	2,000E-02	4,300E-04
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	4,146E-02	3,538E-02	1,100E-01	7,870E-03
	NMHC	g/MJ	1,014E-02	1,452E-02	2,000E-02	3,100E-04
	Partikel	g/MJ	-	1,820E-04	-	-
	Staub	g/MJ	2,968E-03	2,255E-03	-	1,000E-05
	HCl	g/MJ	9,063E-04	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	5,878E-07	1,992E-05	-	-
	Benzol	g/MJ	-	4,902E-05	-	-
BaP	ng/MJ	-	5,488E+01	-	-	
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	[0,000E+00]	1,716E-02	0,000E+00	3,000E-05
	CO	g/MJ	[0,000E+00]	9,240E-03	5,000E-03	1,060E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	6,496E-02	2,562E-02	8,000E-03	1,820E-03
	NMHC	g/MJ	[0,000E+00]	1,848E-02	2,000E-03	9,620E-03
	Partikel	g/MJ	-	1,118E-03	-	-
	Staub	g/MJ	[0,000E+00]	1,845E-03	-	3,000E-05
	HCl	g/MJ	[0,000E+00]	0,000E+00	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	0,000E+00	4,080E-06	-	-
	Benzol	g/MJ	-	7,980E-06	-	-
BaP	ng/MJ	-	1,120E+00	-	-	

<sup>1)</sup> [0,000E+00] negative Bilanzwerte <<0 ergeben sich aus Rückrechnungen und werden daher gleich Null gesetzt.  
<sup>2)</sup> mit Infrastruktur, mit Betankungsemission <sup>3)</sup> ohne Seetransport von Methanol

Tab. 7-21b: Emissionsbilanzdaten für Methanol

			-9-	-10-	-11-	-12-
			NG-MeOH	NG – MeOH	Holz-MeOH	Salixweidenkultur-MeOH
			[95]	[288]	[192]	[86]
		Quelle				
		Qualität	++	++	+++	+
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	3,122E-02	4,003E-06	3,500E-02	4,000E-03
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	1,417E-02	3,867E-05	4,270E-01	3,700E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,602E-02	3,331E-05	3,780E-01	1,330E-01
	NMHC	g/MJ	3,170E-02	9,476E-06	2,520E-01	2,300E-02
	Partikel	g/MJ	-	1,314E-06 <sup>1)</sup>	1,200E-04	-
	Staub	g/MJ	2,600E-03	-	6,600E-02	-
	HCl	g/MJ	-	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-	-	2,400E-03	-
	FormA	g/MJ	-	-	-	-
	Benzol	g/MJ	-	-	1,600E-04	-
	BaP	ng/MJ	-	-	1,400E+02	-
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	0,000E+00	1,560E-07	0,000E+00	0,000E+00
	CO	g/MJ	3,290E-03	2,805E-07	0,000E+00	1,000E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,320E-03	6,202E-07	0,000E+00	2,100E-02
	NMHC	g/MJ	7,000E-04	7,398E-07	0,000E+00	4,000E-03
	Partikel	g/MJ	-	3,947E-08 <sup>1)</sup>	0,000E+00	-
	Staub	g/MJ	0,000E+00	-	0,000E+00	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-	-	0,000E+00	-
	Benzol	g/MJ	-	-	0,000E+00	-
	BaP	ng/MJ	-	-	0,000E+00	-
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,920E-03	-	3,500E-02	4,000E-03
	CO	g/MJ	1,980E-03	-	4,270E-01	3,600E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	8,900E-03	-	3,780E-01	1,120E-01
	NMHC	g/MJ	5,700E-03	-	2,520E-01	1,900E-02
	Partikel	g/MJ	-	-	1,200E-04	-
	Staub	g/MJ	5,000E-04	-	6,600E-02	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-	-	2,400E-03	-
	Benzol	g/MJ	-	-	1,600E-04	-
	BaP	ng/MJ	-	-	1,400E+02	-
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	2,930E-02	-	0,000E+00	0,000E+00
	CO	g/MJ	8,900E-03	-	0,000E+00	0,000E+00
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,380E-02	-	0,000E+00	0,000E+00
	NMHC	g/MJ	2,530E-02	-	0,000E+00	0,000E+00
	Partikel	g/MJ	-	-	0,000E+00	-
	Staub	g/MJ	2,100E-03	-	0,000E+00	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-	-	0,000E+00	-
	Benzol	g/MJ	-	-	0,000E+00	-
	BaP	ng/MJ	-	-	0,000E+00	-

<sup>1)</sup> angegeben als PM<sub>10</sub>

Tab. 7-21c: Emissionsbilanzdaten für Methanol

			-13-	-14-	-15-	-16-
			Deponiegas- MeOH	Fackelgas-MeOH	NG-MeOH	NG-MeOH
			[288]	[288]	[75]	[40]
		Quelle				
		Qualität	++	++	++	++
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	5,196E-05	3,751E-06	-	1,696E-02
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	-8,393E-05	1,855E-06	2,500E-02	2,609E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,364E-05	-3,452E-05	6,000E-02	1,609E-01
	NMHC	g/MJ	-1,283E-06	6,030E-06	3,000E-02	2,826E-02
	Partikel	g/MJ	-2,919E-05 <sup>1)</sup>	-3,838E-06 <sup>1)</sup>	-	-
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	-3,137E-06	1,560E-07	-	-
	CO	g/MJ	-4,038E-05	2,805E-07	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	-3,637E-06	6,202E-07	-	-
	NMHC	g/MJ	-8,396E-07	7,398E-07	-	-
	Partikel	g/MJ	-1,588E-05 <sup>1)</sup>	3,947E-08 <sup>1)</sup>	-	-

<sup>1)</sup> angegeben als PM<sub>10</sub>

Tab. 7-21d: Emissionsbilanzdaten für Methanol

			-17-	-18-	-19-	-20-
			Biomasse-MeOH Minimal	Biomasse-MeOH Maximal	Holz-MeOH	SK-MeOH (2005)
Quelle			[58]	[58]	[75]	[162]
Qualität			o	o	++	-
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	2,000E-03	1,250E-01	-	1,639E-01
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	2,000E-02	1,430E-01	1,150E-01	1,556E-01
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	6,800E-02	1,690E-01	9,500E-02	1,944E-01
	NMHC	g/MJ	2,000E-02	2,300E-02	1,300E-02	1,667E-02
	Partikel	g/MJ	7,000E-03	1,000E-02	-	-
	Staub	g/MJ	-	-	-	3,056E-02

Tab. 7-21e: Emissionsbilanzdaten für Methanol

			-21-	-22-	-23-
			Holz-MeOH (2005)	NG-MeOH (2005)	PV-Elyse-H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> - Absorption-MeOH aus Afrika (2005)
Quelle			[162]	[162]	[162]
Qualität			--	--	--
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	6,667E-02	8,333E-03	3,333E-02
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	3,611E-01	2,500E-02	2,500E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,472E-01	2,778E-02	4,722E-02
	NMHC	g/MJ	1,083E-01	2,778E-03	2,778E-03
	Staub	g/MJ	2,500E-02	2,778E-03	5,556E-03

Tab. 7-22: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Dimethylether

			-1-	-2-	-3-
			NG-DME (diese Arbeit)	NG - DME	Fackelgas - DME
Quelle			[71], [98], [122]	[288]	[288]
Qualität			+++	++	++
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	1,668E+00	5,097E-01	-9,641E-01
	Erdöl	MJ/MJ	3,090E-02	2,624E-02	2,635E-02
	Erdgas	MJ/MJ	1,609E+00	-	-
	SK	MJ/MJ	1,098E-02	-	-
	BK	MJ/MJ	5,983E-03	-	-
	Uran	MJ/MJ	9,978E-03	-	-
	Erneuerbare ET Sonst. ET	MJ/MJ	7,483E-04 -4,031E-07	- 5,062E-01	- -9,671E-01
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	2,399E+01	1,781E-02	-6,392E-02
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	1,370E-01	3,000E-06	-6,505E-05
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	2,608E-04	-4,180E-09	-1,510E-06

Tab. 7-23: Emissionsbilanzdaten für Dimethylether

			-1-	-2-	-3-
			NG-DME (diese Arbeit)	NG - DME	Fackelgas - DME
Quelle			[71], [98], [122]	[288]	[288]
Qualität			+++	++	++
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,826E-02	2,817E-06	2,465E-06
	CO	g/MJ	2,409E-02	3,017E-05	-5,629E-06
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	6,866E-02	2,181E-05	-4,495E-05
	NMHC	g/MJ	4,814E-02	5,091E-06	-1,341E-06
	Partikel	g/MJ	1,898E-03	3,367E-07 <sup>1)</sup>	-4,723E-06
	Staub	g/MJ	3,342E-03	-	-
	HCl	g/MJ	-5,064E-06	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	2,166E-05	-	-
	FormA	g/MJ	-1,443E-05	-	-
	Benzol	g/MJ	2,373E-05	-	-
	BaP	ng/MJ	2,635E+01	-	-
	<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,794E-05	1,298E-07
CO		g/MJ	8,852E-05	2,327E-07	2,327E-07
NO <sub>x</sub>		g/MJ	9,490E-04	5,145E-07	5,145E-07
NMHC		g/MJ	1,204E-03	3,609E-07	3,609E-07
Partikel		g/MJ	2,110E-05	3,273E-08 <sup>1)</sup>	3,273E-08
Staub		g/MJ	0,000E+00	-	-
HCl		g/MJ	5,327E-08	-	-
NH <sub>3</sub>		g/MJ	1,065E-06	-	-
FormA		g/MJ	1,225E-05	-	-
Benzol		g/MJ	2,873E-06	-	-
BaP		ng/MJ	4,112E-01	-	-
<b>OK II</b>		SO <sub>2</sub>	g/MJ	2,901E-02	-
	CO	g/MJ	1,808E-02	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	4,182E-02	-	-
	NMHC	g/MJ	3,734E-02	-	-
	Partikel	g/MJ	1,167E-04	-	-
	Staub	g/MJ	2,447E-03	-	-
	HCl	g/MJ	-1,792E-06	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,599E-05	-	-
	FormA	g/MJ	-2,326E-05	-	-
	Benzol	g/MJ	9,372E-06	-	-
	BaP	ng/MJ	2,428E+01	-	-
	<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,921E-02	-
CO		g/MJ	5,918E-03	-	-
NO <sub>x</sub>		g/MJ	2,588E-02	-	-
NMHC		g/MJ	9,596E-03	-	-
Partikel		g/MJ	1,760E-03	-	-
Staub		g/MJ	8,958E-04	-	-
HCl		g/MJ	-3,325E-06	-	-
NH <sub>3</sub>		g/MJ	4,600E-06	-	-
FormA		g/MJ	-3,418E-06	-	-
Benzol		g/MJ	1,149E-05	-	-
BaP		ng/MJ	1,664E+00	-	-

<sup>1)</sup> angegeben als PM<sub>10</sub>

Tab. 7-24a: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Ethanol

			-1- BioEtOH	-2- Getreide und Stroh- EtOH	-3- Weidenkultur (Salix)-EtOH	-4- Restholz-EtOH
			[187], [122], [71]	[86]	[86]	[86]
			Quelle			
			Qualität	+	+	+
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	4,635E-02	2,700E-00	3,3200E-00	2,540E-00
	Erdöl	MJ/MJ	9,527E-02	-	-	-
	Erdgas	MJ/MJ	5,341E-03	-	-	-
	SK	MJ/MJ	-9,245E-03	-	-	-
	BK	MJ/MJ	-1,837E-02	-	-	-
	Uran	MJ/MJ	-2,482E-02	-	-	-
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	-1,335E-03	2,460E-00	3,100E-00	2,460E-00
	Sonst. ET	MJ/MJ	-4,905E-04	2,400E-01 <sup>1)</sup>	2,200E-01 <sup>1)</sup>	8,000E-00 <sup>1)</sup>
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	4,167E+00 <sup>5)</sup>	3,200E+01 <sup>2)</sup>	2,150E+01 <sup>3)</sup>	1,300E+01 <sup>4)</sup>
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	7,882E-04	-	-	3,000E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	4,891E-02	1,800E-03	-	5,000E-04

<sup>1)</sup> nicht-erneuerbare Energieträger  
<sup>2)</sup> 111 g/MJ für die Umwandlung aus Biomasse nicht berücksichtigt  
<sup>3)</sup> 178 g/MJ für die Umwandlung aus Biomasse nicht berücksichtigt  
<sup>4)</sup> 128 g/MJ für die Umwandlung aus Biomasse nicht berücksichtigt  
<sup>5)</sup> CO<sub>2</sub>-Emission der Verbrennung sind bereits eingeschlossen

Tab. 7-24b: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Ethanol

			-5- BioEtOH	-6- Getreide-EtOH	-7- Holz-EtOH	-8- Krautartige Pflanzen-EtOH
			[185]	[288]	[288]	[288]
			Quelle			
			Qualität	o	++	++
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	1,928E+00	5,064E-01	1,722E+00	1,469E+00
	Erdöl	MJ/MJ	-	2,186E-02	1,780E-02	1,781E-02
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	1,236E+00	-	-	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	6,917E-01	5,054E-01	-1,450E-01	-5,909E-02
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	7,683E+01	4,092E-02	-1,289E-02	-5,287E-03
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	8,137E-02	6,761E-05	-5,804E-06	3,523E-06
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	6,916E-02	3,119E-07	1,109E-05	9,718E-06

Tab. 7-24c: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für Ethanol

			-9- Holz-EtOH <sup>1)</sup>	-10- Getreide/Stroh-EtOH	-11- Bioethanol 2005
			[75]	[40][76]	[162]
			Quelle		
			Qualität	++	+
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	-	-	1,950E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	4,400E+00	3,217E+01	4,926E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	7,600E-02	4,348E-03	2,778E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	1,130E-01	2,000E-03	-

<sup>1)</sup> Berücksichtigung der Regenerierung der Plantage

Tab. 7-25a: Emissionsbilanzdaten für Ethanol

			-1-	-2-	-3-	-4-
			BioEtOH (diese Arbeit)	Getreide und Stroh- EtOH	Weidenkultur (Salix)-EtOH	Restholz-EtOH
Quelle			[71], [122], [187]	[86]	[86]	[86]
Qualität			++	+	+	+
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	9,807E-02	2,500E-02	4,100E-02	1,000E-02
	CO	g/MJ	5,883E-02	2,030E-01	2,700E-01	8,900E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,147E-01	2,700E-01	2,580E-01	1,690E-01
	NMHC	g/MJ	5,984E-02	8,740E-01	1,350E-01	3,800E-02
	Partikel	g/MJ	4,829E-03	-	-	-
	Staub	g/MJ	8,326E-03	-	-	-
	HCl	g/MJ	1,322E-03	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	5,973E-02	-	-	-
	FormA	g/MJ	8,910E-04	-	-	-
	Benzol	g/MJ	4,398E-04	-	-	-
	BaP	ng/MJ	1,452E+01	-	-	-
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	8,554E-06	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	CO	g/MJ	1,579E-05	1,000E-03	1,000E-03	1,000E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,693E-04	1,500E-02	1,500E-02	1,500E-02
	NMHC	g/MJ	1,487E-02	4,000E-03	4,000E-03	4,000E-03
	Partikel	g/MJ	3,765E-06	-	-	-
	Staub	g/MJ	0,000E+00	-	-	-
	HCl	g/MJ	9,504E-09	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,901E-07	-	-	-
	FormA	g/MJ	2,185E-06	-	-	-
	Benzol	g/MJ	5,192E-07	-	-	-
	BaP	ng/MJ	7,336E-02	-	-	-
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	9,631E-02	2,500E-02	4,100E-02	1,000E-02
	CO	g/MJ	5,866E-02	2,020E-01	2,690E-01	8,800E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,130E-01	2,550E-01	2,430E-01	1,540E-01
	NMHC	g/MJ	4,508E-02	8,700E-01	1,310E-01	3,400E-02
	Partikel	g/MJ	4,652E-03	-	-	-
	Staub	g/MJ	8,334E-03	-	-	-
	HCl	g/MJ	1,322E-03	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	5,972E-02	-	-	-
	FormA	g/MJ	8,838E-04	-	-	-
	Benzol	g/MJ	4,380E-04	-	-	-
	BaP	ng/MJ	1,421E+01	-	-	-
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,754E-03	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	CO	g/MJ	1,501E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,591E-03	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	NMHC	g/MJ	-1,114E-04	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	Partikel	g/MJ	1,736E-04	-	-	-
	Staub	g/MJ	-7,660E-06	-	-	-
	HCl	g/MJ	3,312E-07	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	3,072E-06	-	-	-
	FormA	g/MJ	4,959E-06	-	-	-
	Benzol	g/MJ	1,340E-06	-	-	-
	BaP	ng/MJ	2,414E-01	-	-	-

Tab. 7-25b: Emissionsbilanzdaten für Ethanol

			-5-	-6-	-7-	-8-
			BioEtOH	Getreide-EtOH	Holz-EtOH	Krautartige Pflanzen-EtOH
Quelle			[185]	[288]	[288]	[288]
Qualität			o	++	++	++
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	8,595E-02	9,507E-05	-3,339E-05	-1,425E-05
	CO	g/MJ	1,018E-01	2,232E-05	1,077E-04	9,667E-05
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,787E-01	9,836E-05	1,348E-04	1,326E-04
	NMHC	g/MJ	1,432E-02	8,790E-05	2,091E-05	1,971E-05
	Partikel	g/MJ	-	6,832E-06 <sup>1)</sup>	1,817E-05 <sup>1)</sup>	1,691E-05 <sup>1)</sup>
	Staub	g/MJ	1,859E-02	-	-	-
	HCl	g/MJ	1,820E-04	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	3,151E-04	-	-	-
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	-3,908E-03	9,068E-08	6,922E-09	4,810E-08
	CO	g/MJ	-6,377E-01	1,537E-06	1,281E-06	1,357E-06
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	-2,572E-01	3,603E-06	2,831E-06	3,082E-06
	NMHC	g/MJ	-1,345E-02	1,497E-06	1,449E-06	1,457E-06
	Partikel	g/MJ	-	2,112E-07 <sup>1)</sup>	1,756E-07 <sup>1)</sup>	1,909E-07 <sup>1)</sup>
	Staub	g/MJ	3,522E-04	-	-	-
	HCl	g/MJ	0,000E+00	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	4,120E-06	-	-	-
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,975E-02	-	-	-
	CO	g/MJ	7,299E-01	-	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,962E-01	-	-	-
	NMHC	g/MJ	2,583E-02	-	-	-
	Partikel	g/MJ	-	-	-	-
	Staub	g/MJ	1,276E-02	-	-	-
	HCl	g/MJ	1,469E-05	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	3,109E-04	-	-	-
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	4,011E-02	-	-	-
	CO	g/MJ	9,604E-03	-	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,972E-02	-	-	-
	NMHC	g/MJ	1,939E-03	-	-	-
	Partikel	g/MJ	-	-	-	-
	Staub	g/MJ	5,475E-03	-	-	-
	HCl	g/MJ	1,674E-04	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	0,000E+00	-	-	-

<sup>1)</sup> angegeben als PM<sub>10</sub>

Tab. 7-25c: Emissionsbilanzdaten für Ethanol

			-9-	-10-	-11-
			Holz-EtOH <sup>1)</sup>	Getreide/Stroh-EtOh	Bioethanol 2005
Quelle			[75]	[40]	[162]
Qualität			++	+	--
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	-	2,087E-02	<b>6,667E-02</b>
	CO	g/MJ	2,800E-01	2,043E-01	5,000E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,000E-01	2,696E-01	2,889E-01
	NMHC	g/MJ	1,800E-02	9,000E-01	3,056E-02
	Staub	g/MJ	-	-	1,111E-02

<sup>1)</sup> Berücksichtigung der Regenerierung der Plantage

Tab. 7-26a: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für RME

			-1- RME (diese Arbeit)	-2- RME 2010 (mit Gutschrift)	-3- RME (ohne Gutschrift)	-4- RME (mit Gutschrift)
Quelle			[187], [122], [71]	[189]	[121]	[121]
Qualität			+++	+++	+++	+++
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	3,545E-01	-1,491E-01	5,824E-01	-1,551E-01
	Erdöl	MJ/MJ	9,296E-02	-1,600E-01	-	-
	Erdgas	MJ/MJ	2,188E-01	1,400E-01	-	-
	SK	MJ/MJ	1,922E-02	-3,100E-02	-	-
	BK	MJ/MJ	8,767E-03	-4,600E-02	-	-
	Uran	MJ/MJ	1,292E-02	-4,700E-02	-	-
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	1,685E-03	-5,100E-03	-	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	1,616E-04	-	-	-
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	2,140E+01 <sup>1)</sup>	-6,739E+00	3,661E+01 <sup>1)</sup>	-7,038E+00 <sup>1)</sup>
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	4,462E-02	4,760E-03	5,221E-02	5,247E-03
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	1,166E-01	1,160E-01	1,212E-01	1,170E-01

<sup>1)</sup> direkte CO<sub>2</sub>-Emission ist Null, CO<sub>2</sub>-Emission der Verbrennung sind bereits eingeschlossen

Tab. 7-26b: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für RME

			-5- Raps-NG- RME	-6- Raps-NG- RME	-7- Raps-Stroh-RME	-8- RME frei HH+KV
Quelle			[86]	[92]	[92]	[185]
Qualität			+	o	o	++
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	1,800E+00	8,700E-01	6,640E-01	1,329E+00
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	1,460E-00	-	-	1,022E+00
	Sonst. ET	MJ/MJ	3,400E-01 <sup>2)</sup>	-	-	3,067E-01
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	2,300E+01 <sup>2)</sup>	4,190E+01	3,007E+01	3,112E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	2,000E-04	-	-	8,445E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	2,000E-04	-	-	1,932E-01

<sup>2)</sup> nicht-erneuerbare Energieträger

<sup>2)</sup> 13 g/MJ für die Umwandlung aus Biomasse nicht berücksichtigt

Tab. 7-26c: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für RME

			-9- Soja- Biodiesel	-10- Raps-Stroh-RME	-11- RME 2005
Quelle			[288]	[40]	[162]
Qualität			+	++	--
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	3,493E-01	-	2,050E+00
	Erdöl	MJ/MJ	2,401E-02	-	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	3,238E-01	-	-
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	1,734E-02	2,281E+01	4,342E+01
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	5,609E-05	0,000E+00	8,056E-02
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	2,901E-07	2,456E-01	-

Tab. 7-27a: Emissionsbilanzdaten für RME

		-----				
		-1-	-2-	-3-	-4-	
		RME (diese Arbeit)	RME 2010 (mit Gutschrift)	RME (ohne Gutschrift)	RME (mit Gutschrift)	
Quelle	[187], [122], [71]	[189]	[121]	[121]		
Qualität	+++	+++	+++	+++		
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	-2,711E-02	-1,300E-01	5,984E-02	-1,384E-01
	CO	g/MJ	1,003E-02	-3,040E-03	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	7,699E-03	-2,960E-02	1,430E-01	-3,141E-02
	NMHC	g/MJ	2,354E-02	1,696E-02	3,976E-02	1,882E-02
	Partikel	g/MJ	-3,531E-03	-3,910E-03	4,816E-03	-3,953E-03
	Staub	g/MJ	1,021E-02	7,476E-03	1,130E-02	7,333E-03
	HCl	g/MJ	3,392E-04	-	5,682E-04	-2,683E-03
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,575E-01	1,570E-01	1,620E-01	1,592E-01
	FormA	g/MJ	7,589E-05	-	7,680E-04	1,134E-04
	Benzol	g/MJ	4,457E-05	1,500E-05	2,351E-04	4,494E-05
	BaP	ng/MJ	-2,138E-01	-6,301E+00	1,722E+01	-4,706E-02
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	6,330E-06	-	Σ(OKI + OKII)	Σ(OKI + OKII)
	CO	g/MJ	1,169E-05	-	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,253E-04	-	Σ(OKI + OKII)	Σ(OKI + OKII)
	NMHC	g/MJ	3,147E-05	-	Σ(OKI + OKII)	Σ(OKI + OKII)
	Partikel	g/MJ	2,786E-06	-	Σ(OKI + OKII)	Σ(OKI + OKII)
	Staub	g/MJ	0,000E+00	-	Σ(OKI + OKII)	Σ(OKI + OKII)
	HCl	g/MJ	7,033E-09	-	Σ(OKI + OKII)	Σ(OKI + OKII)
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,407E-07	-	Σ(OKI + OKII)	Σ(OKI + OKII)
	FormA	g/MJ	1,617E-06	-	Σ(OKI + OKII)	Σ(OKI + OKII)
	Benzol	g/MJ	4,625E-07	-	Σ(OKI + OKII)	Σ(OKI + OKII)
BaP	ng/MJ	5,429E-02	-	Σ(OKI + OKII)	Σ(OKI + OKII)	
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,939E-02	-8,100E-02	5,301E-02 <sup>1)</sup>	-1,036E-01 <sup>1)</sup>
	CO	g/MJ	1,515E-02	2,430E-03	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	5,643E-02	2,130E-02	1,362E-01 <sup>1)</sup>	2,002E-02 <sup>1)</sup>
	NMHC	g/MJ	2,460E-02	1,850E-02	3,976E-02 <sup>1)</sup>	1,882E-02 <sup>1)</sup>
	Partikel	g/MJ	1,151E-03	9,300E-04	4,190E-03 <sup>1)</sup>	9,395E-04 <sup>1)</sup>
	Staub	g/MJ	1,019E-02	7,480E-03	1,130E-02 <sup>1)</sup>	7,333E-03 <sup>1)</sup>
	HCl	g/MJ	3,963E-04	-	5,682E-04 <sup>1)</sup>	-2,683E-03 <sup>1)</sup>
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,575E-01	1,570E-01	1,620E-01 <sup>1)</sup>	1,592E-01 <sup>1)</sup>
	FormA	g/MJ	1,925E-04	-	7,680E-04 <sup>1)</sup>	1,134E-04 <sup>1)</sup>
	Benzol	g/MJ	7,169E-05	4,400E-05	2,351E-04 <sup>1)</sup>	4,494E-05 <sup>1)</sup>
	BaP	ng/MJ	5,747E+00	-5,100E-02	1,722E+01 <sup>1)</sup>	-4,706E-02 <sup>1)</sup>
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	-4,650E-02	-4,900E-02	6,824E-03	-3,482E-02
	CO	g/MJ	-5,131E-03	-5,470E-03	-	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	-4,886E-02	-5,090E-02	6,824E-03	-5,144E-02
	NMHC	g/MJ	-1,090E-03	-1,540E-03	-	-
	Partikel	g/MJ	-4,685E-03	-4,840E-03	6,256E-04	-4,892E-03
	Staub	g/MJ	1,971E-05	-4,400E-06	0,000E+00	0,000E+00
	HCl	g/MJ	-5,702E-05	-	0,000E+00	0,000E+00
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-5,629E-06	-6,200E-06	0,000E+00	0,000E+00
	FormA	g/MJ	-1,182E-04	-	0,000E+00	0,000E+00
	Benzol	g/MJ	-2,759E-05	-2,900E-05	0,000E+00	0,000E+00
	BaP	ng/MJ	-6,015E+00	-6,250E+00	0,000E+00	0,000E+00

<sup>1)</sup> Zusammenfassung von OK I und OK II

Tab. 7-27b: Emissionsbilanzdaten für RME

			-5-	-6-	-7-	-8-
			Raps-NG-RME	Raps-NG-RME	Raps-Stroh-RME	RME frei HH+KV
			[86]	[92]	[92]	[185]
			Quelle			
			Qualität	+	o	++
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	0,000E+00	1,000E-04	1,000E-04	3,616E-04
	CO	g/MJ	0,000E+00	1,600E-03	1,600E-03	7,968E-04
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,000E-02	5,500E-03	5,500E-03	3,308E-03
	NMHC	g/MJ	0,000E+00	2,000E-04	2,000E-04	4,610E-04
	Partikel	g/MJ	-	4,000E-04	4,000E-04	-
	Staub	g/MJ	-	-	-	1,716E-04
	HCl	g/MJ	-	-	-	0,000E+00
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-	-	-	2,007E-06
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	3,000E-03	1,742E-01	1,796E-01	2,335E-02
	CO	g/MJ	4,600E-02	5,380E-02	8,886E-02	7,705E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,570E-01	2,092E-01	2,174E-01	1,142E-01
	NMHC	g/MJ	3,100E-02	1,898E-01	1,076E-01	2,393E-03
	Partikel	g/MJ	-	2,660E-02	3,320E-02	-
	Staub	g/MJ	-	-	-	8,234E-03
	HCl	g/MJ	-	-	-	3,580E-05
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-	-	-	5,652E-04
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	4,770E-02
	CO	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	9,514E-03
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	3,784E-02
	NMHC	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	2,399E-03
	Partikel	g/MJ	-	0,000E+00	0,000E+00	-
	Staub	g/MJ	-	-	-	5,791E-03
	HCl	g/MJ	-	-	-	1,718E-03
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-	-	-	0,000E+00
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	0,000E+00	1,000E-04	1,000E-04	3,616E-04
	CO	g/MJ	0,000E+00	1,600E-03	1,600E-03	7,968E-04
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,000E-02	5,500E-03	5,500E-03	3,308E-03
	NMHC	g/MJ	0,000E+00	2,000E-04	2,000E-04	4,610E-04
	Partikel	g/MJ	-	4,000E-04	4,000E-04	-
	Staub	g/MJ	-	-	-	1,716E-04
	HCl	g/MJ	-	-	-	0,000E+00
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-	-	-	2,007E-06
	FormA	g/MJ	-	-	-	-
	Benzol	g/MJ	-	-	-	-
	BaP	ng/MJ	-	-	-	-

Tab. 7-27c: Emissionsbilanzdaten für RME

			-9-	-10-	-11-
			Soja-Biodiesel <sup>1)</sup>	Raps-Stroh-RME	RME 2005
			[288]	[40]	[162]
			Quelle		
			Qualität	+	++
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,428E-05	3,070E-03	6,389E-02
	CO	g/MJ	2,638E-05	4,605E-02	5,000E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	6,733E-05	1,667E-01	4,917E-01
	NMHC	g/MJ	8,075E-05	3,114E-02	3,611E-02
	Partikel	g/MJ	2,553E-06 <sup>2)</sup>	-	-
	Staub	g/MJ	-	-	1,389E-02

<sup>1)</sup> verfügbare Angaben für OK I << 1,000E-5.<sup>2)</sup> angegeben als PM<sub>10</sub>

Tab. 7-28a: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für EVU-Strom (Deutschland)

			-1- Strommix (Niederspannung)	-2- Strommix (Niederspannung) 2010	-3- Strommix (Niederspannung) 2000,	-4- Strommix (Niederspannung) 2005
Quelle			[71], [122], [191]	[188]	[117]	[153], [236]
Qualität			+++	+++	++	+
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	2,969E+00	2,944E+00	3,019E+00	3,028E+00
	Erdöl	MJ/MJ	4,303E-02	4,167E-02	5,833E-02	-
	Erdgas	MJ/MJ	2,835E-01	2,639E-01	2,056E-01	-
	SK	MJ/MJ	6,556E-01	6,528E-01	7,917E-01	-
	BK	MJ/MJ	8,028E-01	8,222E-01	8,778E-01	-
	Uran	MJ/MJ	1,089E+00	1,089E+00	9,389E-01	-
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	7,525E-02	7,500E-02	1,139E-01	-
	Sonst. ET	MJ/MJ	1,974E-02	-	3,333E-02	-
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	1,681E+02	1,661E+02	1,881E+02	1,844E+02
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	2,994E-01	2,972E-01	4,111E-01	4,748E-01
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	6,248E-03	6,111E-03	-	-

Tab. 7-28a: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für EVU-Strom (Deutschland)

			-5- Strommix (Niederspannung) 2010 <sup>1)</sup>	-6- Strommix (Niederspannung)	-7- Strommix (Niederspannung)	-8- Strommix Brutto 2010
Quelle			[76]	[85]	[185]	[188]
Qualität			++	o	++	+++
<b>Primär- energie</b>	Summe	MJ/MJ	3,073E+00	2,054E+00	2,975E+00	2,416E+00
	Erdöl	MJ/MJ	5,778E-02	-	-	7,500E-03
	Erdgas	MJ/MJ	2,972E-01	-	-	2,028E-01
	SK	MJ/MJ	6,833E-01	-	-	5,444E-01
	BK	MJ/MJ	8,419E-01	-	-	6,694E-01
	Uran	MJ/MJ	1,115E+00	-	-	9,278E-01
	Erneuerbare ET	MJ/MJ	7,694E-02	-	4,855E-02	6,389E-02
	Sonst. ET	MJ/MJ	-	-	2,926E+00	-
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	1,690E+02	1,933E+02	1,911E+02	1,336E+02
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	3,156E-01	-	4,392E-01	1,944E-03
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	7,056E-03	-	6,857E-03	4,722E-03

<sup>1)</sup> einschließlich Infrastruktur

Tab. 7-28a: Primärenergie- und Klimagasbilanzdaten für EVU-Strom (Deutschland)

			-9- Strommix (Niederspannung)	-10- Strommix (Niederspannung) 1998	-11- Strommix (Niederspannung) 2005	-12- Strommix (Niederspannung) 2005
Quelle			[75]	[124]	[214]	[162]
Qualität			+	+++	+	-
<b>Primärenergie</b>	Summe	MJ/MJ	2,700E+00	3,250E+00	3,380E+00	2,610E+00
<b>Global</b>	CO <sub>2</sub>	g/MJ	1,780E+02	1,922E+02	2,861E+02	1,625E+02
	CH <sub>4</sub>	g/MJ	1,400E-01	4,444E-01	1,006E+00	3,417E-01
	N <sub>2</sub> O	g/MJ	-	8,333E-03	-	-

Tab. 7-29a: Emissionsbilanzdaten für EVU-Strom (Deutschland)

			-1-	-2-	-3-	-4-
			Strommix (Niederspannung)	Strommix (Niederspannung) 2010	Strommix (Niederspannung) 2000,	Strommix (Niederspannung) 2005
Quelle			[191], [122], [71]	[188]	[117]	[153], [236]
Qualität			+++	+++	++	+
<b>OK I+II+III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,471E-01	1,472E-01	1,242E-01	1,894E-01
	CO	g/MJ	7,589E-02	4,722E-02	4,906E-02	1,458E-01
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,848E-01	1,833E-01	1,614E-01	2,022E-01
	NMHC	g/MJ	1,192E-02	1,167E-02	4,944E-03	1,211E-02
	Partikel	g/MJ	3,916E-03	3,889E-03	-	-
	Staub	g/MJ	8,882E-03	7,222E-03	2,278E-02	1,778E-02
	HCl	g/MJ	9,305E-03	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,308E-04	1,389E-05	-	-
	FormA	g/MJ	2,367E-04	-	-	-
	Benzol	g/MJ	8,959E-05	1,000E-04	8,333E-05	-
	BaP	ng/MJ	7,385E+00	7,222E-03	-	-
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	CO	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	NMHC	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	Partikel	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
	Staub	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	HCl	g/MJ	0,000E+00	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
	FormA	g/MJ	0,000E+00	-	-	-
	Benzol	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-
	BaP	ng/MJ	0,000E+00	0,000E+00	-	-
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,144E-01	1,144E-01	1,083E-01	1,628E-01
	CO	g/MJ	7,195E-02	4,340E-02	4,722E-02	4,583E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,504E-01	1,489E-01	1,444E-01	1,767E-01
	NMHC	g/MJ	9,960E-03	9,730E-03	4,444E-03	9,722E-03
	Partikel	g/MJ	7,318E-04	7,039E-04	-	-
	Staub	g/MJ	8,828E-03	7,172E-03	6,944E-03	1,444E-02
	HCl	g/MJ	9,269E-03	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,228E-04	6,097E-06	-	-
	FormA	g/MJ	1,558E-04	-	-	-
	Benzol	g/MJ	7,056E-05	8,100E-05	8,333E-05	-
	BaP	ng/MJ	3,280E+00	3,120E-03	-	-
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	3,269E-02	3,283E-02	1,583E-02	2,667E-02
	CO	g/MJ	3,938E-03	3,825E-03	1,833E-03	1,000E-01
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	3,437E-02	3,447E-02	1,694E-02	2,556E-02
	NMHC	g/MJ	1,957E-03	1,937E-03	5,000E-04	2,386E-03
	Partikel	g/MJ	3,184E-03	3,185E-03	-	-
	Staub	g/MJ	5,401E-05	5,056E-05	1,583E-02	3,333E-03
	HCl	g/MJ	3,598E-05	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	7,999E-06	7,792E-06	-	-
	FormA	g/MJ	8,085E-05	-	-	-
	Benzol	g/MJ	1,903E-05	1,900E-05	0,000E+00	-
	BaP	ng/MJ	4,105E+00	4,102E-03	-	-

Tab. 7-29b: Emissionsbilanzdaten für EVU-Strom (Deutschland)

			-5-	-6-	-7-	-8-
			Strommix (Niederspannung) 2010 <sup>1)</sup>	Strommix (Niederspannung)	Strommix (Niederspannung)	Strommix Brutto 2010
Quelle			[76]	[85]	[185]	[188]
Qualität			++	o	++	+++
<b>OK</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,658E-01	8,785E-01	1,163E-01	6,944E-02
<b>I+II+III</b>	CO	g/MJ	6,889E-02	8,299E-02	6,262E-02	3,333E-02
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	2,017E-01	2,690E-01	1,646E-01	1,000E-01
	NMHC	g/MJ	1,403E-02	3,976E-01 <sup>2)</sup>	1,094E-02	1,944E-03
	Partikel	g/MJ	4,722E-03	-	-	-
	Staub	g/MJ	9,056E-03	1,271E-01 <sup>3)</sup>	2,083E-02	6,120E-02
	HCl	g/MJ	-	-	5,134E-03	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	3,056E-05	-	1,984E-07	-
	FormA	g/MJ	-	-	-	-
	Benzol	g/MJ	1,139E-04	-	-	4,444E-05
	BaP	ng/MJ	1,258E+01	-	-	6,944E-04
<b>OK I</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	1,664E-05	-
	CO	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	3,667E-05	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	1,522E-04	-
	NMHC	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	2,122E-05	-
	Partikel	g/MJ	0,000E+00	-	-	-
	Staub	g/MJ	0,000E+00	0,000E+00	7,895E-06	-
	HCl	g/MJ	-	-	0,000E+00	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	0,000E+00	-	9,236E-08	-
	Benzol	g/MJ	0,000E+00	-	-	-
	BaP	ng/MJ	0,000E+00	-	-	-
<b>OK II</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	1,260E-01	8,785E-01	1,040E-01	-
	CO	g/MJ	6,407E-02	8,193E-02	5,548E-02	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,593E-01	2,671E-01	1,453E-01	-
	NMHC	g/MJ	1,164E-02	3,880E-01 <sup>2)</sup>	9,649E-03	-
	Partikel	g/MJ	8,028E-04	-	-	-
	Staub	g/MJ	8,965E-03	1,271E-01 <sup>3)</sup>	1,818E-02	-
	HCl	g/MJ	-	-	4,827E-03	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,406E-05	-	1,060E-07	-
	Benzol	g/MJ	9,111E-05	-	-	-
	BaP	ng/MJ	7,550E+00	-	-	-
<b>OK III</b>	SO <sub>2</sub>	g/MJ	3,980E-02	3,000E-05	1,227E-02	-
	CO	g/MJ	4,822E-03	1,060E-03	7,098E-03	-
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	4,235E-02	1,820E-03	1,914E-02	-
	NMHC	g/MJ	2,385E-03	9,620E-03 <sup>2)</sup>	1,269E-03	-
	Partikel	g/MJ	3,919E-03	-	-	-
	Staub	g/MJ	9,056E-05	3,000E-05 <sup>3)</sup>	2,641E-03	-
	HCl	g/MJ	-	-	3,073E-04	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	1,650E-05	-	0,000E+00	-
	Benzol	g/MJ	2,278E-05	-	-	-
	BaP	ng/MJ	5,033E+00	-	-	-

<sup>1)</sup> einschließlich Infrastruktur

<sup>2)</sup> angegeben als Partikel

<sup>3)</sup> angegeben als HC

Tab. 7-29c: Emissionsbilanzdaten für EVU-Strom (Deutschland)

			-9-	-10-	-11-	-12-
			Strommix (Niederspannung)	Strommix (Niederspannung 1998)	Strommix (Niederspannung 2005)	Strommix (Niederspannung 2005)
Quelle			[75]	[124]	[214]	[162]
Qualität			+	+++	+	-
OK	SO <sub>2</sub>	g/MJ	-	2,722E-01	1,978E-01	8,611E-02
I+II+III	CO	g/MJ	2,800E-02	4,722E-02	7,500E-02	1,694E-01
	NO <sub>x</sub>	g/MJ	1,400E-01	1,583E-01	3,136E-01	2,417E-01
	NMHC	g/MJ	1,200E-02	8,333E-03	1,861E-02	2,500E-02
	Staub	g/MJ	-	-	1,556E-02	1,944E-02
	HCl	g/MJ	-	-	-	-
	NH <sub>3</sub>	g/MJ	-	2,778E-06	-	-
	Benzol	g/MJ	-	8,333E-05	-	-

Tab. 7-30a: Auswahl der wesentlichen Datengrundlagen für die Untersuchung unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte

Lfd.-Nr.	Fahrzeugkonzept	Fahrzeugbetrieb [145], [146]		Fahrzeugherst ellung Massen, Verbrauch, Emission	Herstellung/ Betrieb Kostendaten
		Verbrauch, Emissionen	Lärm		
1	Ref. VKM-Otto	[244], [137], [212], [36], [122], [137], [212]	[63], [130], [131]	[244], [281]	[105], [172], [237]
2	Ref. VKM-Otto DI	[36], [122], [137], [212],	[63], [130], [131]	[281]	[172]
3	Ref. VKM EMVT	[36], [122], [137], [212],	[63], [130], [131]	[244], [281]	[206]
4	Ref. VKM-Otto-Start/Stopp	[143], [36], [122], [137],	[63], [130], [131]	[281]	[105], [172], [175], [237]
5	Ref. VKM-Otto-LLReifen	[258], [36], [122], [137], [212],	[63], [130], [131]	[244], [281]	[105], [172], [237]
6	Ref. VKM-Otto-LL-Öl	[111], [242], [258], [274], [36], [122], [137], [212]	[63], [130], [131]	[244], [281]	[105], [172], [237], [244]
7, 8	Benzin-DI	[36], [122], [137], [212]	[63], [130], [131]	[281], [31]	[172]
9, 10	VKM-Benzin-Hubred.-Lader	[36]	[63], [130], [131]	[244], [281], [31], [176]	[172], [237], [244]
11, 12	S-Hybrid-Benzin-DI	[36], [122], [137], [212]	[63], Schätzung	[281], [31]	[172], [175] [237], [244]
13, 14	S-Hybrid-Benzin-Stirling	[33]	[63], Schätzung	[281], [31]	[33], [172], [175],
15, 16	P-Hybrid-Benzin-DI	[36]	[63], Schätzung	[281], [31], [176]	[105], [172], [175]
17, 18	VKM-Diesel	[16], [36], [122], [137], [204], [213], [243]	[63], [130], [131]	[171], [281]	[105], [172]
19, 20	VKM-RME-DI	[122], [137], [213], [16], [36], [204], [243]	[63], [130], [131]	[171], [281]	[105], [172]
21, 22	VKM-DME-DI	[16], [36], [122], [137], [204], [213], [243]	[63], [130], [131]	[172]	[105], [172]
23	VKM-Diesel-SDI (1Liter)	[16], [36], [122], [137], [204], [213], [243]	[63], [130], [131]	[171], [281]	[172]
24, 25	S-Hybrid-Diesel	[16], [36], [122], [137], [204], [213], [243]	[63], Schätzung	[171], [281]	[172]
26, 27	S-Hybrid (opt.)-Diesel	[16], [36], [122], [137], [204], [213], [243]	[63], Schätzung	[171], [281]	[172], [175]

Tab. 7-30b: Auswahl der wesentlichen Datengrundlagen für die Untersuchung unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte

Lfd.-Nr.	Fahrzeugkonzept	Fahrzeugbetrieb [145], [146]		Fahrzeugherstellung Massen, Verbrauch, Emission	Herstellung/Betrieb Kosten Kostendaten
		Verbrauch, Emissionen	Lärm		
28, 29	<b>P-Hybrid-Diesel</b>	[16], [36], [122], [137], [204], [213], [243]	[63], Schätzung	[171], [281]	[105], [172], [175]
30, 31	<b>P-Hybrid (opt.)-Diesel</b>	[16], [36], [122], [137], [204], [213], [243]	[63], Schätzung	[171], [281]	[172], [175]
32, 33	<b>VKM-CNG</b>	[46], [122], [137]	[130], [131], Schätzung	[281], [176]	[29], [105], [172]
34, 35	<b>VKM-LNG</b>	[46], [122], [137]	[130], [131], Schätzung	[176]	[29], [105], [172]
36, 37	<b>VKM-EtOH</b>	[226], [278]	[130], [131], Schätzung	[176]	[29], [172]
38-41	<b>VKM-Methanol</b>	[170]	[130], [131], Schätzung	[281], [176]	[29], [172]
42, 43	<b>S-Hybrid-Methanol-R-BZ</b>	[278]	[63], [99], Schätzung	[281]	[29], [88], [147], [171], [172], [175]
44, 45	<b>BZ-Methanol-R</b>	[226], [244]	[63], [99], Schätzung	[244], [281]	[29], [88], [147], [171], [172], [175]
46, 47	<b>DMBZ-Methanol</b>	[278]	[63], [99], Schätzung	[281]	[29], [172]
48, 49	<b>VKM-CGH2</b>	[226], [94], [278]	[130], [131], Schätzung	[244]	[147], [172]
50, 51	<b>VKM-LH2</b>	[226], [94], [278]	[130], [131], Schätzung	[244], [281]	[172]
52, 53	<b>BZ-CGH2</b>	[226], [244]	[63], [99], Schätzung	[226], [244]	[88], [105], [147], [171], [172], [175]
54, 55	<b>BZ-LH2</b>	[226], [244]	[63], [99], Schätzung	[281]	[88], [105], [147], [171], [172], [175]
56	<b>ESF</b>	[226]	[63], Schätzung	[281]	[147], [172], [175]

Tab. 7-31: Komponentengruppen und Kosten eines Antriebsstrangs mit Ottomotor eines Pkw der unteren Mittelklasse, 1600 cm<sup>3</sup>, 75 kW (nach [65])

Komponentengruppe Verbrennungskraftmaschine	Kostenanteil	Absolute Kosten	Relative Kosten
	%	€	€/kW
Verbrennungsmotor	45%	860,50 €	11,47
Motorelektronik	12%	229,47 €	3,06
Fahrzeugelektronik	9%	172,10 €	2,29
Getriebe	16%	305,96 €	4,08
Abgasanlage	11%	210,35 €	2,80
davon: Katalysator	60%	126,21 €	1,68
Lambda-Sonde	10%	21,03 €	0,28
Restliche Komponenten	30%	63,10 €	0,84
Kühlsystem	3%	57,37 €	0,76
Kraftstoffsystem	5%	95,61 €	1,27
Summe	100%	1.912,23 €	25,50
C-Teile (Stecker, Schrauben, etc.)	+10%	191,22 €	2,55
<b>Spezifische Kosten für den Antrieb</b>			
A-B-Teile			25
A-B-C-Teile			28
A-B-Teile ohne Abgasanlage			23
A-B-C-Teile ohne Abgasanlage			25

Tab. 7-32: Komponentengruppen und Kosten eines Antriebsstrang mit Brennstoffzelle und Methanolreformer, 75 kW B-Zelle, 55 kW Elektromotor (nach [65])

Komponentengruppe Verbrennungskraftmaschine	Kostenanteil	Absolute Kosten	Relative Kosten Bezug auf	
	%	€	Antrieb €/kW	Brennstoffzelle €/kW
<b>A. Stromerzeugungssystem, davon</b>	45%	1.390,71 €	25,29	18,54
<i>1. Brennstoffzellenstack</i>	50%	695,36 €	12,64	9,27
bestehend aus MEA-Einheit	50%	347,68 €	6,32	4,64
Biploarplatten	37%	265,87 €	4,83	3,54
Dichtungen	8%	61,36 €	1,12	0,82
Endplatten	5%	40,90 €	0,74	0,55
<i>2. Gaserzeugungssystem</i>	30%	409,03 €	7,44	5,45
bestehend aus Verdampfer	10%	40,90 €	0,74	0,55
Methanol-H <sub>2</sub> O-Reformer:	40%	163,61 €	2,97	2,18
a. <u>Plattenpaket</u>	80%	143,16 €	2,60	1,91
b. <u>Nicht Edelmetallkatalysator</u>	20%	40,90 €	0,74	0,55
Katalytischer Brenner:	20%	81,81 €	1,49	1,09
a. <u>Behälter</u>	20%	20,45 €	0,37	0,27
b. <u>Edelmetall-Katalysator</u>	80%	61,36 €	1,12	0,82
PROX-Reaktor:	20%	40,90 €	0,74	0,55
a. <u>Plattenpaket</u>	25%	20,45 €	0,37	0,27
b. <u>Edelmetall-Katalysator</u>	75%	61,36 €	1,12	0,82
POX-Reaktor	10%	40,90 €	0,74	0,55
<i>3. Kompressor/Expander-Einheit</i>	15%	204,52 €	3,72	2,73
<i>4. Peripherie</i>	5%	61,36 €	1,12	0,82
bestehend aus Pumpen (Kühlmittel, Wasser, Methanol)	60%	40,90 €	0,74	0,55
Wasserausgleichsbehälter	30%	20,45 €	0,37	0,27
Deionisierungsfilter	10%	- €	0,00	0,00
<b>B. Steuerungs-, Regelungs-, Sensortechnik</b>	23%	715,81 €	13,01	9,54
davon <i>1. Traktionsmotor</i>	65%	470,39 €	8,55	6,27
<i>2. DCDC Wandler</i>	31%	224,97 €	4,09	3,00
<i>3. Reluktanzmotor Kompressor/Expandereinheit</i>	4%	20,45 €	0,37	0,27
<b>C. Fahrzeugelektrik, davon</b>	20%	613,55 €	11,16	8,18
<i>1. Traktionsmotor</i>	76%	470,39 €	8,55	6,27
<i>2. DCDC Wandler</i>	9%	61,36 €	1,12	0,82
<i>3. Reluktanzmotor Kompressor/Expandereinheit</i>	5%	40,90 €	0,74	0,55
<i>4. Reluktanzmotor Methanol-Dosierpumpe</i>	1%	- €	0,00	0,00
<i>5. Reluktanzmotor Wasser-Dosierpumpe</i>	1%	- €	0,00	0,00
<i>6. Batterie</i>	8%	40,90 €	0,74	0,55
<b>D. Getriebe</b>	4%	122,71 €	2,23	1,64
<b>E. Abgasanlage, Ansaugschalldämpfer mit Luftfilter und Luftvorwärmer</b>	1%	40,90 €	0,74	0,55
<b>E. Kühlsystem</b>	2%	61,36 €	1,12	0,82
<b>F. Kraftstoffsystem</b>	4%	102,26 €	1,86	1,36
Summe	99%	3.067,75 €	55,78	40,90
C-Teile (Stecker, Schrauben, etc.)	10%	306,78 €	5,58	4,09

Tab. 7-33: Gegenüberstellung von Speicherkennwerten und spezifische Kosten für flüssige und gasförmige Treibstoffe

Treibstoffspeicher	Verdunstungs-	Gewichtsbezogene Energiedichte (gefüllt)	Energiebezogenen Speicherkosten
	verluste		
	%/d	MJ/kg	Cent/MJ
<b>Benzin</b>	-	38,5	3,58
<b>Diesel</b>	-	38,5	3,27
<b>RME</b>	-	32,8	3,50
<b>DME</b>	-	15,1	6,15
<b>CNG</b>	-	9,4	121,51
<b>LNG</b>	-	24,0	119,05
<b>Ethanol</b>	-	23,9	5,44
<b>Methanol</b>	-	17,8	6,65
<b>Druckwasserstoff</b>	-	14,0	283,42
<b>Flüssigwasserstoff</b>	0,5	14,4	120,00
<b>Batteriespeicher (Tab. 7-35)</b>	< 1	4,3	8.333,30

Tab. 7-34: Verbrauchsminderungspotentiale bei der Verwendung von Leichtlaufölen

Kraftstoff	Fahrzeug/ Motor	Leichtlauföl	Referenzöl	Zyklus	Minderungspotential			Quelle
					Min.	Max.	Ø	
k.A.	60 KW	LL-Motoröl	k.A.	Ø, warm	2,0%	4,0%	3,0%	[111], [274]
k.A.	k.A.	Getriebe-, Differentialöl		Ø, warm	1,0%	2,0%	1,5%	[111], [274]
k.A.	k.A.	SAE 0W-30	SAE 15W-40	Durchschnitt	-	-	5,5%	[111], [274]
Benzin	Audi A4, 1,8l	SAE 0W-30	SAE 15W-40	NEFZ	-	-	4,0%	[111], [274]
Benzin	Golf, 1,4 l, 44kW	SAE 0W-30	SAE 15W-40	NEFZ	4,8%	6,1%	5,4%	[242]
<i>Referenz</i>	<i>1200 cm³, 40 kW</i>	<i>SAE 0W-30</i>	<i>SAE 15W-40</i>	<i>NEFZ</i>			4,7%	-
Benzin	Audi A4, 1,8l	SAE 0W-30	SAE 15W-40	NEFZ IO, kalt	-	-	7,1%	[111], [274]
Benzin	Golf, 1,4 l	SAE 0W-30	SAE 15W-40	NEFZ IO, kalt	-	-	5,8%	[111]
Benzin	Golf, 1,4 l	SAE 5W-20	SAE 15W-40	NEFZ IO, kalt	-	-	5,1%	[111]
Benzin	Audi A4, 1,8l	SAE 0W-30	SAE 15W-40	NEFZ IO, warm	-	-	3,7%	[111], [274]
Benzin	Audi A4, 1,8l	SAE 0W-30	SAE 15W-40	NEFZ IO	-	-	5,4%	[111], [274]
Benzin	Golf, 1,4 l	SAE 0W-30	SAE 15W-40	NEFZ IO	-	-	4,7%	[111]
Benzin	Golf, 1,4 l	SAE 5W-20	SAE 15W-40	NEFZ IO	-	-	4,7%	[111]
Benzin	Golf, 1,4 l, 44 kW	SAE 0W-30	SAE 15W-40	NEFZ, IO	3,9%	6,1%	5,0%	[242]
<i>Referenz</i>	<i>1200 ccm, 40 kW</i>	<i>SAE 0W-30</i>	<i>SAE 15W-40</i>	<i>Ø Innerorts</i>	-	-	4,9%	-
Diesel	5-Zylinder TDI	SAE 5W-40	SAE 15W-40	FTP 75	-	-	3,0%	[111], [274]
Benzin	Audi A4, 1,8l	SAE 0W-30	SAE 15W-40	NEFZ AO	-	-	2,0%	[111], [274]
Benzin	Golf, 1,4 l	SAE 0W-30	SAE 15W-40	NEFZ, AO	4,0%	5,6%	4,8%	[242]
<i>Referenz</i>	<i>1200 ccm, 40 kW</i>	<i>SAE 0W-30</i>	<i>SAE 15W-40</i>	<i>Ø Außerorts</i>	-	-	3,3%	-
Benzin	Golf, 1,4 l	SAE 0W-30	SAE 15W-40	Autobahn	-	-	2,2%	[111]
Benzin	Golf, 1,4 l	SAE 5W-20	SAE 15W-40	Autobahn	-	-	1,4%	[111]
<i>Referenz</i>	<i>1200 ccm, 40 kW</i>	<i>SAE 0W-30</i>	<i>SAE 15W-40</i>	<i>Ø Autobahn</i>	-	-	1,8%	-
Referenz- Pkw	1200 cm³, 40 kW	SAE 0W-30	SAE 15W-40	NEFZ			4,7%	
				Ø Innerorts			4,9%	
				Ø Außerorts			3,3%	
				Ø Autobahn			1,8%	
IO:	Innerorts	AO:	Außerorts	AB:	Autobahn			
FTP75:	US Fahrzyklus	NEFZ:	Neuer europäischer Fahrzyklus	Ø:	durchschnittliche Fahrleistung D			

Tab. 7-35: Zusammenstellung von Kenndaten elektrochemischer Speicher und Ultrakondensator

		Pb-Gel	Ni/Cd	Na/NiCl <sub>2</sub>	Ni/MH	Li/Ion	Ultrakon- densator
<b>Energiedichte</b>	Wh/kg	30-36	40-65	60-98	55-70 <sup>5)</sup>	100-150	4,1
	Wh/l	70-100	90-120	80-150	140-170	110-210	5-7
<b>Leistungsdichte bei 80% Entladung</b>	W/kg	80-250	80-175	60-155	150-200	300-430	1.100
	W/l	175-230	200-360	110-265	310-490	-	1.500
<b>Arbeitstemperatur</b>	°C	-10...+40	-40...+55	+250...370	-10...+50	-10...+50	-10...+50
<b>Standverluste</b>	% / d	< 0,1	0,6-1	12-17	< 0,1	0,12	-
<b>Lade-Entlade- Wirkungsgrad</b>	%	70	65	91 <sup>4)</sup>	-	-	-
<b>Lebensdauer</b>	Zyklen	500-800	1600-2000	500-1500	800-1200	500-750	-
<b>Wartung</b>	-	nein	nein	nein	nein	nein	nein
<b>Kosten Traktionsbatterie</b>	€/kWh	128-256 <sup>1)</sup>	614-	307-1.483 <sup>2)</sup>	170-378 <sup>6)</sup>	200-340	170-17.000 <sup>2)</sup>
		140	1.968 <sup>2)3)</sup>	300	300	275	-
<b>Starterbatterie</b>		36 <sup>3)</sup>	-	-	820 <sup>8)</sup>	511-820 <sup>8)</sup>	-
	€/kWh	51-77 <sup>8)9)</sup>	-	-	-	-	-
	€/kW	-	-	-	-	-	6-29 <sup>2)</sup>
<b>Datengrundlage</b>	-	[236], [219]	[236]	[236]	[171], [173], [219], [297]	[171], [173], [219]	[171]
<sup>1)</sup> 128 €/kWh für die Produktion von 10.000 Einheiten p.a. und heutiger Preis				<sup>6)</sup> DAUG nach ([171], [172])			
<sup>2)</sup> Zielpreis und heutige Kosten der Einheit				<sup>6)</sup> kostenoptimierte Batterien in Massenproduktion nach [297]; Mindestkosten einer Dual-Mode Hybridbatterie (1,5 kWh) können bei 760-1134 €/kWh liegen [175].			
<sup>3)</sup> heutige Kosten der Batterie nach [62]; bei kleineren Zellen (z.B. für Hybridfahrzeuge) ist ein Anstieg der spezifischen Kosten möglich				<sup>7)</sup> Energiedichten nach [166]			
<sup>4)</sup> 12h Laden - 5h Entladen				<sup>8)</sup> Kostenangaben für Starterbatterien nach [219] und Hinweis auf Änderungen anlässlich der Tagung			
<sup>5)</sup> Zielwerte für Energiedichten; Daten der Firma				<sup>9)</sup> Preisangaben für 12 V-Systeme und 36 V-Systeme			

Tab. 7-36: Zusammenstellung von PNGV-Zielwerte elektrochemischer Speicher [171]

		Energiespeicher		Leistungsspeicher	
		Elektrostraßen- fahrzeug (Ziel)	Hybridfahrzeug (Ziel)	Schnell anspre- chende Systeme <sup>1)</sup>	Langsam anspre- chende Systeme <sup>2)</sup>
<b>Energiedichte</b>	Wh/kg	200	60	-	-
	Wh/l	300	75	-	-
<b>Leistungsdichte</b>	W/kg	400	1.600	630 <sup>3)</sup>	1.000 <sup>3)</sup>
	W/l	600	2.000	780 <sup>3)</sup>	1.600 <sup>3)</sup>
<b>Lebensdauer</b>	Zyklen	1.000	1.000-2.000	50.000	120.000
	Jahre	10	10	10	10
<b>Zielkosten</b>	€/kWh	113 €/kWh	170 €/kWh	944 €/kWh	-
	€/kW	-	-	13,6 €/kW	8,7 €/kW
<sup>1)</sup> Maximale Entladeleistung (18 s) 25 kW				<sup>3)</sup> bezogen auf die Entladeleistung	
<sup>2)</sup> Maximale Entladeleistung (18 s) 65 kW					

Tab. 7-37: Fahrzeugwirkungsgrade, Verbrauchswerte und CO<sub>2</sub>-Emissionen

Lfd.-Nr.	Abkürzung	Treibstoff	Masse kg	Fahrzeug- wirkungsgrad				Verbrauch				CO <sub>2</sub> -Emission			
				NEFZ	IO	AO	AB	NEFZ	IO	AO	AB	NEFZ	IO	AO	AB
				%				MJ/km				g/km			
1	Ref. VKM-Otto	Benzin	953	17,2	13,5	25,0	31,0	1,99	2,43	1,63	1,70	144	176	118	123
2	Ref. VKM-Otto DI	Benzin	951	20,2	16,9	28,7	32,0	1,69	1,94	1,42	1,65	122	140	103	119
3	Ref. VKM EMVT	Benzin	945	22,3	16,9	32,9	35,6	1,52	1,93	1,23	1,48	110	140	89	107
4	Ref. VKM-Start/Stopp	Benzin	965	18,1	14,8	25,8	31,0	1,91	2,23	1,60	1,70	138	162	116	123
5	Ref. VKM-LLReifen	Benzin	951	17,2	13,5	25,0	31,0	1,89	2,29	1,54	1,42	137	166	112	103
6	Ref. VKM--LLÖl	Benzin	951	18,1	15,0	26,3	31,3	1,88	2,18	1,55	1,68	137	158	112	122
7	VKM-Benzin-DI	Benzin	629	23,6	17,7	27,7	35,0	1,04	1,20	1,02	0,76	75	87	74	55
8	VKM-Benzin-DI	Benzin	633	23,6	17,7	27,7	35,0	1,04	1,21	1,03	0,76	75	88	74	55
9	VKM-BeHubredLader	Benzin	566	23,9	17,9	28,2	35,5	0,94	1,08	0,94	0,73	68	79	68	53
10	VKM-BeHubredLader	Benzin	570	23,9	17,9	28,2	35,5	0,94	1,08	0,94	0,73	68	79	68	53
11	S-Hybrid-Benzin-DI	Benzin	857	25,3	19,0	29,7	37,5	1,24	1,48	1,18	0,77	90	107	86	56
12	S-Hybrid-Benzin-DI	Benzin	861	25,3	19,0	29,7	37,5	1,24	1,48	1,18	0,77	90	107	86	56
13 14	S-Hybrid-Be-Stirling <sup>1)</sup>	Benzin	805	35,2	26,4	41,3	44,4	0,85	1,00	0,81	0,64	61	73	59	46
15	P-Hybrid-Benzin-DI	Benzin	714	26,7	20,1	31,4	39,7	1,01	1,19	0,98	0,69	73	86	71	50
16	P-Hybrid-Benzin-DI	Benzin	720	26,7	20,1	31,4	39,7	1,01	1,19	0,98	0,69	73	86	71	50
17	VKM-Diesel	Diesel	644	24,6	21,2	31,7	40,0	1,01	1,03	0,91	0,67	75	76	67	49
18	VKM-Diesel	Diesel	650	26,1	21,2	33,0	43,5	0,96	1,04	0,88	0,61	71	77	65	46
19	VKM-RME-DI	RME	647	24,6	21,2	31,7	40,0	1,02	1,03	0,91	0,67	77	78	69	50
20	VKM-RME-DI	RME	653	26,1	21,2	33,0	43,5	0,97	1,04	0,88	0,62	73	78	66	46
21	VKM-DME-DI	DME	668	25,5	21,7	27,7	40,0	1,01	1,03	1,06	0,67	68	70	72	45
22	VKM-DME-DI	DME	673	27,0	21,7	28,9	43,5	0,96	1,04	1,03	0,62	64	70	69	42
23	VKM-Diesel-SDI <sup>1)</sup>	Diesel	400	41,2	35,4	53,0	66,9	0,32	0,37	0,24	0,21	24	28	18	15
24	S-Hybrid-Diesel	Diesel	870	25,8	22,1	33,1	41,8	1,23	1,29	1,07	0,69	91	96	80	51
25	S-Hybrid-Diesel	Diesel	877	27,3	22,1	34,5	45,4	1,17	1,30	1,03	0,64	87	96	77	47
26	S-Hybrid (opt.) Diesel	Diesel	779	32,1	27,5	41,2	52,0	0,90	0,94	0,79	0,54	67	69	59	40
27	S-Hybrid (opt.) Diesel	Diesel	785	34,0	27,5	43,0	56,6	0,86	0,94	0,77	0,50	64	70	57	37
28	P-Hybrid-Diesel	Diesel	733	28,5	24,5	36,7	46,3	0,97	1,00	0,86	0,60	72	74	64	44
29	P-Hybrid-Diesel	Diesel	739	30,2	24,5	38,2	50,3	0,92	1,00	0,83	0,55	68	74	61	41
30	P-Hybrid (opt.) Diesel	Diesel	704	31,8	24,5	36,7	46,3	0,84	0,96	0,83	0,59	62	71	62	44
31	P-Hybrid (opt.) Diesel	Diesel	711	33,7	24,5	38,2	50,3	0,80	0,97	0,80	0,54	59	72	60	40
32	VKM-CNG	CNG	698	23,1	17,7	27,7	35,0	1,15	1,32	1,10	0,78	67	77	64	45
33	VKM-CNG	CNG	702	23,1	17,7	27,7	35,0	1,15	1,32	1,10	0,78	67	77	64	45
34	VKM-LNG	LNG	651	23,1	17,7	27,7	35,0	1,09	1,24	1,05	0,76	63	72	61	45
35	VKM-LNG	LNG	656	23,1	17,7	27,7	35,0	1,09	1,24	1,05	0,76	63	72	61	45
36	VKM-EtOH	BioEtOH	637	24,0	17,7	27,7	35,0	1,03	1,22	1,03	0,76	73	86	73	54
37	VKM-EtOH	BioEtOH	642	24,0	17,7	27,7	35,0	1,03	1,22	1,03	0,76	73	86	73	54
38, 39	VKM-Methanol	(Bio)MeOH	647	24,0	17,7	27,7	35,0	1,04	1,23	1,04	0,76	74	87	74	54
40, 41	VKM-Methanol	(Bio)MeOH	651	24,0	17,7	27,7	35,0	1,04	1,23	1,04	0,76	74	87	74	54
42, 43	S-Hybrid-MethanolBZ	(Bio)MeOH	789	41,6	33,7	49,3	49,8	0,70	0,77	0,67	0,56	50	55	47	40
44, 45	BZ-Methanol	(Bio)MeOH	651	29,4	23,8	34,8	35,2	0,86	0,92	0,83	0,76	60	65	59	54
46, 47	DMBZ-Methanol	(Bio)MeOH	752	29,4	23,8	34,8	35,2	0,86	0,92	0,83	0,76	60	65	59	54
48, 49	VKM-CGH2	CGH2	676	23,6	17,7	27,7	35,0	1,10	1,28	1,07	0,77	0	0	0	0
50, 51	VKM-LH2	LH2	674	23,6	17,7	27,7	35,0	1,10	1,28	1,07	0,77	0	0	0	0
52, 53	BZ-CGH2	CGH2	632	38,2	34,1	43,3	41,7	0,64	0,63	0,65	0,64	0	0	0	0
54, 55	BZ-LH2	LH2	631	38,2	34,1	43,3	41,7	0,64	0,63	0,65	0,64	0	0	0	0
56	ESF	Strommix	896	60,4	61,5	60,0	58,8	0,54	0,48	0,60	0,50	0	0	0	0

<sup>1)</sup> wegen unzureichender umweltbezogener Gesamtdaten erfolgt keine Endauswertung für dieses Fahrzeug

Tab. 7-38: Vergleich des Referenz-Pkw der Kleinwagenklasse mit verfügbaren Fahrzeugen

Fahrzeugtyp	Technische Daten	Gewicht [kg]	Erläuterung	Zyklus	Verbrauch		CO <sub>2</sub> [g/km]	Datenquelle
					[MJ/km]	[l/100km]		
Kleinwagen	1200 cm <sup>3</sup> , 40 kW	900	Festlegung	NEFZ	1,93	6,0	140	[244]
VW Polo	1200 cm <sup>3</sup> , 40 kW	1.040	Herstellerwert	NEFZ	1,97	6,1	143	[285]
VW Lupo	999 cm <sup>3</sup> , 37 kW	914	3 Pkw Feldtests	NEFZ	1,88	5,9	137	[212]
Toyota Yaris	998 cm <sup>3</sup> , 50 kW	998	3 Pkw Feldtests	NEFZ	1,95	6,0	141	[212]
Nissan Micra	998 cm <sup>3</sup> , 40 kW	958	3 Pkw Feldtests	NEFZ	2,10	6,5	152	[212]
Pkw, HBEFA	<1400 cm <sup>3</sup>	k.A.	Mittelwert 2003	∅ Innerorts	2,52	7,8	183	[137]
VW Polo	1200 cm <sup>3</sup> , 40 kW	1040	Herstellerwert	NEFZ IO	2,51	7,8	182	[285]
VW Lupo	999 cm <sup>3</sup> , 37 kW	914	3 Pkw Feldtests	NEFZ IO	2,48	7,7	180	[212]
Toyota Yaris	998 cm <sup>3</sup> , 50 kW	998	3 Pkw Feldtests	NEFZ IO	2,34	7,3	169	[212]
Nissan Micra	998 cm <sup>3</sup> , 40 kW	958	3 Pkw Feldtests	NEFZ IO	2,58	8,0	187	[212]
VW Lupo	999 cm <sup>3</sup> , 37 kW	914	3 Pkw Feldtests	FTP Phase 1	2,03	6,3	147	[212]
Nissan Micra	998 cm <sup>3</sup> , 40 kW	958	3 Pkw Feldtests	FTP Phase 1	2,19	6,8	159	[212]
Pkw, HBEFA	<1400 cm <sup>3</sup>	k.A.	Mittelwert 2003	∅ Außerorts	1,82	5,7	132	[137]
VW Polo	1200 cm <sup>3</sup> , 40 kW	1040	Herstellerwert	NEFZ AO	1,90	5,9	138	[285]
VW Lupo	999 cm <sup>3</sup> , 37 kW	914	3 Pkw Feldtests	NEFZ AO	1,54	4,8	111	[212]
Toyota Yaris	998 cm <sup>3</sup> , 50 kW	998	3 Pkw Feldtests	NEFZ AO	1,73	5,4	125	[212]
Nissan Micra	998 cm <sup>3</sup> , 40 kW	958	3 Pkw Feldtests	NEFZ AO	1,82	5,7	132	[212]
VW Lupo	999 cm <sup>3</sup> , 37 kW	914	3 Pkw Feldtests	FTP 75	1,95	6,1	141	[212]
Toyota Yaris	998 cm <sup>3</sup> , 50 kW	998	3 Pkw Feldtests	FTP 75	3,12	9,7	226	[212]
Nissan Micra	998 cm <sup>3</sup> , 40 kW	958	3 Pkw Feldtests	FTP 75	2,14	6,6	155	[212]
Pkw, HBEFA	<1400 cm <sup>3</sup>	k.A.	Mittelwert 2003	∅ Autobahn	2,34	7,3	170	[137]
VW Lupo	999 ccm, 37 kW	914	3 Pkw Feldtests	Autobahn	1,83	5,7	133	[212]
Toyota Yaris	998 ccm, 50 kW	998	3 Pkw Feldtests	Autobahn	2,28	7,1	165	[212]
Nissan Micra	998 ccm, 40 kW	958	3 Pkw Feldtests	Autobahn	2,25	7,0	163	[212]
VW Lupo	999 ccm, 37 kW	914	3 Pkw Feldtests	FTP Phase 2	2,02	6,3	146	[212]
Nissan Micra	998 ccm, 40 kW	958	3 Pkw Feldtests	FTP Phase 2	2,21	6,9	160	[212]
<b>Referenz-Pkw</b>	<b>1400 cm<sup>3</sup>, 44 kW</b>	<b>950 kg</b>		<b>NEFZ</b>	<b>1,99</b>	<b>6,2</b>	<b>144</b>	
				<b>∅ Innerorts</b>	<b>2,43</b>	<b>7,5</b>	<b>176</b>	
				<b>∅ Außerorts</b>	<b>1,63</b>	<b>5,1</b>	<b>118</b>	
				<b>∅ Autobahn</b>	<b>1,7</b>	<b>5,3</b>	<b>123</b>	
IO:	Innerorts	AO:	Außerorts	AB:	Autobahn			
FTP, FTP75:	US Fahrzyklus	NEFZ:	Neuer europäischer Fahrzyklus	∅:	durchschnittliche Fahrleistung D			
		HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren					

Tab. 7-39: Methan-, Benzol-, Toluol- und Xylol-Anteile an den HC-Emissionen, sowie N<sub>2</sub>O und NH<sub>3</sub>-Emissionsfaktoren für Kfz-Abgase konventioneller Pkw ([116], [137], [227], Schätzungen)

	NEFZ (IO) / FTP-Mittelwert <sup>1)</sup>		Kaltstart-Zuschlag <sup>2)</sup>	Warmbetrieb niedrige Dynamik <sup>3)</sup>	Warmbetrieb hohe Dynamik <sup>4)</sup>
<b>Otto-Pkw (Geregelter Katalysator)</b>					
<b>Abgasstandard</b>	<b>EURO 4</b>	<b>SULEV<sup>6)</sup></b>			
<b>Methan</b>	14,0%	25%	3,5%	22,4%	22,4%
<b>Benzol</b>	6,0%	6%	5,1%	8,1%	8,5% (AO) 8,9% (AB)
<b>Toluol</b>	11,5%	11%	12,1%	10,9%	10,4%
<b>Xylol</b>	10,0%	10%	11,0%	9,0%	8,1%
<b>N<sub>2</sub>O<sup>5)7)</sup></b>	3 mg/km	1 mg/km	-	1 mg/km	
<b>NH<sub>3</sub></b>	10 mg/km		-	-	-
<b>Diesel-Pkw und Diesel-Lkw (EURO 4, Diesel)</b>					
<b>Methan</b>				2,4%	
<b>Benzol</b>				1,9%	
<b>Toluol</b>				0,8%	
<b>Xylol</b>				0,8%	
<b>N<sub>2</sub>O</b>	11 mg/km		-	4 mg/km	
<b>NH<sub>3</sub></b>	1 mg/km		-	-	-
<sup>1)</sup> auf dem Stadtfahrzyklus-Anteil des NEFZ und auf FTP-Gesamttestdaten basierende Faktoren; die direkte Anwendung ist auf eine Grobschätzung beschränkt. <sup>2)</sup> spezifisch mit der Aufwärmphase von Motoren verbundene, zusätzliche Emission <sup>3)</sup> HC-Emission betriebswarmer Motoren; Innerortsverkehr, stockender Verkehr außerorts und auf Autobahnen <sup>4)</sup> HC-Emission betriebswarmer Motoren; fließender Verkehr außerorts (AO) und auf Autobahnen (AB) <sup>5)</sup> N <sub>2</sub> O wird in einem bestimmten Temperaturfenster unter leicht fetten Bedingungen gebildet. Durch Verbesserung der Lambdaregelung und fortschreitenden schnelleren Aufheizmethoden für den Katalysator werden Anzahl und Dauer dieser Fenster verringert. Eigene Schätzungen nach Abb. 7-24, [227]. Da Messungen an LPG-EURO 2 Fahrzeugen zu nahezu gleichen Ergebnissen wie für Benzin führen, werden für die Treibstoffe im Ottomotor zunächst identische Emissionsfaktoren angenommen. <sup>6)</sup> Schätzwerte <sup>7)</sup> für Benzin-Direkteinspritzer Verdoppelung des Emissionsfaktors					

Tab. 7-40: Anteil der mittleren Methanemissionen an den Gesamtkohlenwasserstoffemissionen von Kfz ([116], [122], [170], Schätzungen)

Treibstoff	Verbrennungskraftmaschine			Brennstoffzelle
	EURO 4 (Diesel)	EURO 4 (Benzin)	SULEV <sup>1) 2)</sup>	SULEV <sup>1)</sup>
Benzin	-	14%	25%	-
Diesel	2,4%	4% <sup>2)</sup>	-	-
RME	2,4%	4% <sup>2)</sup>	-	-
CNG, LNG	-	89,3%	> 95%	-
CGH <sub>2</sub> , LH <sub>2</sub> <sup>3)</sup>	-	6,8%	12%	k.A. <sup>4)</sup>
MeOH	-	33% <sup>6)</sup>	59%	0% <sup>5)</sup>
DME	2,4%	4% <sup>2)</sup>	-	0% <sup>5)</sup>
BioEtOH	-	30% <sup>1)6)</sup>	54% <sup>6)</sup>	0% <sup>5)</sup>
<sup>1)</sup> Schätzung <sup>2)</sup> geringfügige Erhöhung des relativen Anteils mit fortschreitenden Grenzwertanforderungen durch erhöhte Wirkung von geregelten Dreiwege-, Oxidations- und teilweise kombiniert wirkende Edelmetallkatalysatoren (DeNOx) auf langkettigere Kohlenwasserstoffe			<sup>3)</sup> Wasserstoffverbrennungsmotoren werden als SULEV-Fahrzeug eingeordnet (thermisches NO <sub>x</sub> , HC aus Öl) <sup>4)</sup> Fahrzeugkonzept ohne HC Emissionen <sup>5)</sup> HC Emissionen quantifizierbar, jedoch keine CH <sub>4</sub> -Emissionen <sup>6)</sup> Werte gelten für ottomotorische Verbrennung	

Tab. 7-41: Anteil der mittleren Formaldehydemissionen an den Gesamtkohlenwasserstoffemissionen von Kfz mit Verbrennungsmotor ([41], [170], [275], [279], Schätzungen)

Fahrzeugkonzept	Stand	Zyklus	HC-Emission [g/km]	FormA-Emission [mg/km]	FormA-Anteil an HC	Quelle
Otto-G-Kat	US-G-Kat	FTP 75	0,11	2,2	2,1%	[275]
Otto-G-Kat	Tier 1	FTP 75	0,12	0,9	0,8%	[170]
Diesel-Pkw	Modell 1987	FTP 75	0,18	8,1	4,5%	[275]
Diesel-Pkw	EURO 2	FTP 75	0,07	5,7	8,6%	[279], [210]
Diesel-Pkw	Modell 1993	FTP 75	-	6,0-11,7	8,0-16,0%	[41]
RME-Pkw	Modell 1993	FTP 75	-	9,0-22,7	18,6-30,3%	[41]
Methanol 85%	Tier 1	FTP 75	0,05	6,4	12,3%	[170]
Methanol 100%	Tier 1	FTP 75	0,04	7,0	17,9%	[170], Schätzung
Methanol 100%	Digijet-G-Kat	FTP 75	0,05	8,3	15,6%	[275]
Methanol 100%	K-Jetronic	FTP 75	0,11	41,0	38,8%	[275]
Ethanol	ohne Kat	FTP 75	1,56	463,0	29,8%	[275]
Propan	G-Kat	FTP 75	0,32	2,2	0,7%	[275]
<i>Otto-G-Kat</i>	EURO 4	NEFZ	0,06	0,3	0,5%	diese Arbeit
<i>Diesel</i>	EURO 4	NEFZ	0,03	2,7	9,0%	
<i>RME</i>	EURO 4	NEFZ	0,03	5,4	18,0%	
<i>DME</i>	EURO 4	NEFZ	0,03	2,7	12,0%	
<i>Erdgas</i>	EURO 4	NEFZ	0,06	0,15	0,5%	
<i>Wasserstoff</i>	EURO 4	NEFZ	0,0006	0,003	0,5%	
<i>Methanol</i>	EURO 4	NEFZ	0,03	4,5	15,0%	
<i>Ethanol</i>	EURO 4	NEFZ	0,03	4,5	15,0%	

Tab. 7-42: Heizleistungsbedarf und Emissionsfaktoren für eine Zusatzheizung ([63], eigene Berechnungen)

	Leistung W	CO <sub>2</sub> g/km	CO g/km	HC g/km	NO <sub>x</sub> g/km	Verbrauch MJ/km
Pkw Frühjahr / Herbst	1000	9,93	0,008	0,00029	0,0011	0,13
Pkw Winter	2000	19,9	0,015	0,00058	0,0023	0,26
<i>Pkw Ø Jahr</i>	<i>1000</i>	<i>9,93</i>	<i>0,008</i>	<i>0,00029</i>	<i>0,0011</i>	<i>0,13</i>

Tab. 7-43: Herstellungskosten für stahlintensive Pkw [233]

		Golf-Klasse untere Mittelklasse Europa				Ford Taurus, Chrysler Concorde, GM Lumina, PNGV-Klasse, Mittelklasse USA			
		Otto 61 kW		Diesel 54 kW		Otto 61 kW		Diesel 54 kW	
		Kosten	Gewicht	Kosten	Gewicht	Kosten	Gewicht	Kosten	Gewicht
		€	Kg	€	Kg	€	Kg	€	Kg
<b>Antrieb</b>	Motor, Elektronik, Kühler, Kraftstoffsystem, Abgas-system, halbautomatisches Handschaltgetriebe., Antriebsachse	2.350,00 €	205,1	3.100,00 €	237,9	2.350,00 €	206,7	3.100,00 €	239,5
<b>Chassis</b>	Vorderradaufhängung, Hinterradaufhängung, Hilfs-rahmen, Pedalsystem, Antriebsräder, Reifen, Brems-anlage, Lenkung, Zubehör	1.845,00 €	182,1	1.845,00 €	182,1	1.845,00 €	182,1	1.845,00 €	182,1
<b>Karosserie</b>	Rohbau, Kotflügel, Zusatzbauteile Karosserie, Bauteile der Vormontage, Frontbauteile, Rückseitenbauteile, Unterbodenbauteile, Aerodynamische Bauteile, Vergla-sung, Innenbauteile, Dichtungen und Verschweißungen, Sitze, Seitenairbag, Dreipunktgurte, Klimatisierung	2.711,00 €	509,2	2.711,00 €	509,7	2.968,00 €	573,4	2.968,00 €	573,9
<b>Fahrzeug-elektronik</b>	Allgemeine Elektronik, Beleuchtung, Kabelbaum, Radio, Scheibenwischer, Waschanlage, Batterie	1.350,00 €	36,7	1.350,00 €	36,7	1.350,00 €	35,5	1.350,00 €	35,5
<b>Montage</b>		1.284,00 €		1.284,00 €		1.375,00 €		1.375,00 €	
<b>Summe</b>	Fahrzeug einschl. Antrieb (ohne Montage)	8.256,00 €	933,1 kg	9.006,00 €	966,4 kg	8.513,00 €	997,7 kg	9.263,00 €	1031,0 kg
	Fahrzeug ohne Antrieb (ohne Montage)	<b>5.906,00 €</b>	<b>8,11 €/kg</b>	<b>5.906,00 €</b>	<b>8,11 €/kg</b>	<b>6.163,00 €</b>	<b>7,79 €/kg</b>	<b>6.163,00 €</b>	<b>7,79€/kg</b>
	Fahrzeug ohne Antrieb (mit Montage)	7.190,00 €	<b>9,88 €/kg</b>	7.190,00 €	<b>9,87 €/kg</b>	7.538,00 €	<b>9,53 €/kg</b>	7.538,00 €	<b>9,52 €/kg</b>

Tab. 7-44: Gewichtsreduktion durch die Verwendung neuer Materialien für den Karosserieleichtbau

Karosserieleichtbau Material	Referenz	Gewichtsreduktion	Relative Bauteilkosten zur Referenz <sup>1)</sup>	Quellen	Materialkosten
-	-	%	-	-	€/kg
Hochfestigkeitsstahl	Flussstahl	10 - 24	1	[174], [175]	0,75-1,0
Aluminium	Stahl, Stahlguss	40 - 60	1,3 - 2	[174], [175]	2,50-3,75 <sup>3)</sup>
Magnesium	Stahl, Stahlguss	60 - 75	1,5 - 2,5	[174], [175]	3,0-4,1 <sup>3)</sup>
Magnesium	Aluminium	25 - 35	1 - 1,5	[174], [175]	3,0-4,1 <sup>3)</sup>
Glasfaser verstärkte Polymere	Flussstahl	25 - 35	1 - 1,5	[174], [175]	k.A.
Kohlefaser verstärkte Polymere	Flussstahl	50 - 65	2 - >10	[174], [175]	7,5->20,0 <sup>3)</sup>
Aluminium (MMC <sup>2)</sup> )	Stahl, Stahlguss	50 - 65	1,54 - 3	[174], [175]	3,5-5,0 <sup>3)</sup>
Titan	Legierter Stahl	40 - 55	1,5 - >10	[174], [175]	5,0-20,0 <sup>3)</sup>
Edelstahl	Flussstahl	25 - 40	1,2 - 1,7	[174], [175]	k.A.

<sup>1)</sup> einschließlich Material und Herstellungskosten    <sup>2)</sup> Metal Matrix Composite, Metall Matrix Verbundstruktur  
<sup>3)</sup> Zielpreis und heutige Kosten der Einheit

Tab. 7-45: Technologien zur Abgasnachbehandlung von Otto-Pkw Motoren und deren Minderungspotentiale und Kosten im Vergleich zum technischen Stand EURO 1 nach 91/441/EWG [237]

Abgasminderungssysteme	Abgasminderung Vergleich zu EURO 1			Herstellungskosten
	CO [%]	HC [%]	NO <sub>x</sub> [%]	€/System
Elektrisch beheizter Katalysator + Sekundärluft	70 - 85	60 - 80	10 - 20 <sup>1)</sup>	100 - 180
Brennergestützter Katalysator + Sekundärluft	50 - 85	40 - 80	10 - 20 <sup>1)</sup>	125 - 180
HC-Falle, Bypass-System	-	60 - 75	-	75 - 100
HC Adsorber, Integration in den Dreiwege-Katalysator	-	Kapazitätsabhängig	-	10 - 15
Sekundärluft	20 - 50	20 - 50	0 - 10	25 - 100
Startkatalysator + Wärmetauscher + HC-Falle + Sekundärluft	70 - 80	60 - 80	0 - 20	100 - 180
Motornaher Katalysator (Pd Beschichtung)	-	50	-	10 - 15
Verbesserte Abgasrückführung (AGR)	-	5 - 10	40 - 60	20 - 45
Verbesserte AGR + Optimierung der Magerlauffähigkeit	-	40 - 50	40 - 60	20 - 45
Variabler Ansaugkrümmer + AGR	-	-	max. 80 <sup>2)</sup>	50 - 80
Verbesserte Lambda-Regelung	20 - 30	40 - 50	-	0 - 5
Variable Ventilsteuerung + interne AGR <sup>3)</sup>	70 - 85	60 - 80	max. 60 <sup>2)</sup>	75 - 125

<sup>1)</sup> Vermeidung ansteigender NO<sub>x</sub>-Emissionen im Zuge der Adaption erforderlich  
<sup>2)</sup> Messergebnisse aus Rohgasemissionen oder besondere Fahrzyklen  
<sup>3)</sup> Hauptschwerpunkt der Maßnahme liegt auf der Minderung der Verbrauchswerte

Tab. 7-46: Technologien zur Abgasnachbehandlung von Diesel-Pkw Motoren und deren Minderungspotentiale und Kosten im Vergleich zum technischen Stand EURO 1 nach 91/441/EWG [237]

Abgasminderungssysteme	Abgasminderung Vergleich zu EURO 1				Herstellungskosten
	CO [%]	HC [%]	NO <sub>x</sub> [%]	Partikel [%]	€/System
Verbesserte Motortechnologie (Brennraumgeometrie, Hochdruckeinspritzung) <sup>1)</sup>	-	50	70	80	-
Zeolit-Katalysatoren mit Reduktionsmittel	-	-	80 - 90	-	125 - 150
DeNO <sub>x</sub> -Katalysator	-	-	40	-	75 - 100
Verbesserte Abgasrückführung (AGR)	-	-	50 - 70	-	35 - 45
Verbesserte Oxidationskatalysatoren	10 - 30	10 - 30	-	0 - 10	10
Partikelfiltersysteme	-	-	-	50 - 90	125 - 310

<sup>1)</sup> nur gültig für einige Motoren mit kleinem Hubvolumen und Pkw mit niedrigem Leergewicht (Mittelklasse-Pkw)

Tab. 7-47a: Gegenüberstellung von berechneten Kosten und Preisen für verschiedene Treibstoffe

Treibstoff / Herstellung / Aggregatzustand		Kosten				Quelle
		Cent/MJ		€/Benzinäquivalent		
<b>Benzin (Superkraftstoff)</b>	<b>flüssig</b>	<b>0,75</b>		<b>0,24</b>		<b>diese Arbeit</b>
Benzin ab Rotterdam, einschl. Transport		0,60	-	0,19	-	[56]
Ottokraftstoff Normal (Transport, Marge ca.22%)		0,84	-	0,27	-	[267]
Benzin		0,90	-	0,29	-	[78]
Benzin, typische Kosten ohne Steuer		0,45	0,68	0,15	0,22	[218]
Benzin, Eurosuper 95 (Kosten 2000)		0,64	1,06	0,21	0,34	[151]
Benzin, Eurosuper		0,46	-	0,15	-	[266]
Benzin, Superplus		0,52	-	0,17	-	[152]
Benzin (ROZ 95)		0,52	-	0,17	-	[152]
Standardbenzin (Kosten 1992)		0,58	-	0,19	-	[86]
Superkraftstoff (Importpreis 66%, Sonstiges 34%)		0,74	-	0,24	-	[17]
Reformuliertes Benzin (Kosten 1992)		0,64	0,67	0,21	0,22	[86]
<b>Diesel (schwefelarm)</b>	<b>flüssig</b>	<b>0,71</b>		<b>0,24</b>		<b>diese Arbeit</b>
Dieselkraftstoff (Zukunftsszenario)		0,64	-	0,21	-	[12]
Diesel (Transport, Marge ca. 22%)		0,80	-	0,26	-	[267]
Diesel		0,90	-	0,29	-	[78]
Diesel, typische Kosten ohne Steuer		0,34	0,57	0,11	0,18	[218]
Schwefelfreier Diesel, typische Kosten		0,45	0,68	0,15	0,22	[218]
Standarddiesel (Kosten 1992)		0,51	-	0,16	-	[86]
City-Diesel (Kosten 1992)		0,64	-	0,21	-	[86]
<b>CNG (Erdgas)</b>	<b>gas</b>	<b>0,80</b>		<b>0,26</b>		<b>diese Arbeit</b>
CNG		1,07	-	0,34	-	[105]
CNG (einschl. Betankung)		0,72	-	0,23	-	[86]
CNG - Biogas		1,16	-	0,37	-	[86]
CNG		1,00	-	0,32	-	[78]
CNG (einschl. Transport, Marge ca. 15%)		0,81	-	0,26	-	[267]

Tab. 7-47b: Gegenüberstellung von berechneten Kosten und Preisen verschiedene Treibstoffe

Treibstoff / Herstellung / Aggregatzustand		Kosten				Quelle
		Cent/MJ		€/Benzinäquivalent		
<b>LNG (Erdgas, verflüssigt in Übersee)</b>	<b>flüssig</b>	<b>0,70</b>		<b>0,23</b>		<b>diese Arbeit</b>
LNG, dezentraler Verflüssiger		0,52	0,52	0,17	0,17	[12]
LNG, zentraler Verflüssiger		0,45	-	0,15	-	[12]
LNG, Import, Lkw Transport		0,46	-	0,15	-	[12]
LNG, Import (Algerien, 2001)		0,34	0,52	0,11	0,17	[196]
LNG, Import, zusätzlich 20% Transport/Marge		0,40	0,63	0,13	0,20	[196]
<b>CGH<sub>2</sub> (Druckwasserstoff aus Erdgas, zentrale Großreformer)</b>	<b>gas</b>	<b>2,1</b>		<b>0,68</b>		<b>diese Arbeit</b>
<b>CGH<sub>2</sub> (Druckwasserstoff aus Erdgas, dezentrale Kleinreformer)</b>	<b>gas</b>	<b>2,8</b>		<b>0,90</b>		<b>diese Arbeit</b>
CGH <sub>2</sub> aus Erdgas, verdichtet für Verkehr		1,38	2,53	0,44	0,81	[162]
CGH <sub>2</sub> aus Erdgas, zentral, ohne Tankstelle		1,77	1,92	0,57	0,62	[267]
CGH <sub>2</sub> aus Erdgas		2,46	-	0,79	-	[105]
CGH <sub>2</sub> , Dampfreformer, Großanlage, Tankstelle		4,22	6,83	1,36	2,20	[178]
CGH <sub>2</sub> , Dampfreformer, Kleinanlage, Tankstelle		5,99	7,98	1,93	2,57	[178]
CGH <sub>2</sub> -Elektrolyse, Windstrom, Tankstelle		8,70	10,69	2,80	3,44	[178]
CGH <sub>2</sub> -Elektrolyse, Solarstrom, Tankstelle		15,25	17,24	5,55	1,79	[178]
CGH <sub>2</sub> -Elektrolyse, Großanlage, Tankstelle		8,38	12,00	2,70	3,86	[178]
CGH <sub>2</sub> -Elektrolyse, Kleinanlage, Tankstelle		11,28	13,27	3,63	4,27	[178]
H <sub>2</sub> aus Erdgas (ohne Verdichtung, Vergleich)		1,50	-	0,48	-	[78]
H <sub>2</sub> on-site Dampfreformer, ohne Tankstelle		1,62	3,91	0,52	1,26	[267]
H <sub>2</sub> -Elektrolyse (Wasserkraft, Vergleich)		3,25	-	1,05	-	[78]
H <sub>2</sub> -Elektrolyse (Windkraft, Vergleich)		4,00	-	1,29	-	[78]
H <sub>2</sub> -Elektrolyse (Solarkraft, Vergleich)		5,80	-	1,87	-	[78]
H <sub>2</sub> von on-site Elektrolyseuren, ohne Tankstelle		4,19	4,79	1,35	1,54	[267]
<b>LH<sub>2</sub> (Flüssigwasserstoff aus Erdgas, zentrale Großreformer)</b>	<b>flüssig</b>	<b>2,5</b>		<b>0,80</b>		<b>diese Arbeit</b>
<b>LH<sub>2</sub> (Elektrolyse, Strom aus erneuerbarer Wind- und Wasserkraft)</b>	<b>flüssig</b>	<b>4,5</b>		<b>1,45</b>		<b>diese Arbeit</b>
LH <sub>2</sub> aus Erdgas, zentral, ohne Tankstelle		1,68	3,54	0,54	1,14	[267]
LH <sub>2</sub> aus Erdgas		1,94	-	0,63	-	[37]
LH <sub>2</sub> aus Erdgas, Tankstelle		5,49	7,74	1,77	2,49	[178]
LH <sub>2</sub> Elektrolyse ab HH aus Wasserkraft (Kanada)		2,86	3,57	0,92	1,15	[162]
LH <sub>2</sub> Elektrolyse aus Wasserkraft		2,22	-	0,72	-	[37]
LH <sub>2</sub> Elektrolyse aus Windkraft		3,33	-	1,07	-	[37]
LH <sub>2</sub> aus Biomasse		3,06	-	0,98	-	[37]
LH <sub>2</sub> aus Elektrolyse und Solarstrom		5,83	-	1,88	-	[37]
LH <sub>2</sub> Elektrolyse, Großanlage, Tankstelle		7,88	11,75	2,54	3,78	[178]
LH <sub>2</sub> Elektrolyse, Kleinanlage, Tankstelle		10,78	13,03	3,47	4,19	[178]
LH <sub>2</sub> Elektrolyse aus Solarkraft, Tankstelle		14,75	17,00	4,75	5,47	[178]
LH <sub>2</sub> Elektrolyse aus Windkraft, Tankstelle		8,20	10,45	2,64	3,36	[178]
LH <sub>2</sub> Elektrolyse aus Wasserkraft, Tankstelle		3,72	6,58	1,20	2,12	[178]

Tab. 7-47c: Gegenüberstellung von berechneten Kosten und Preisen verschiedene Treibstoffe

Treibstoff / Herstellung / Aggregatzustand		Kosten				Quelle
		Cent/MJ		€/Benzinäquivalent		
Methanol aus Erdgas	flüssig	1,25		0,40		diese Arbeit
Biomethanol aus Biomasse	flüssig	2,90		0,93		diese Arbeit
Methanol		4,20	-	1,35	-	[78]
Methanol aus Erdgas		0,65	-	0,21	-	[54]
Methanol aus Erdgas		2,14	-	0,69	-	[105]
Methanol aus Erdgas		0,75	-	0,24	-	[86], [222]
Methanol, Importpreis		1,89	-	0,61	-	[105]
Methanol, Durchschnittspreis METHANEX 2000		0,92	-	0,30	-	[167]
Methanol, Durchschnittspreis METHANEX 2001		0,99	-	0,32	-	[167]
Methanol, US Golfküste Spot Markt (März 2002)		0,72	-	0,23	-	[167]
Methanol, US Golfküste Spot Markt (April 2002)		1,19	1,21	0,38	0,39	[167]
Methanol, Asien Pazifik Spot Markt (April 2002)		0,77	0,85	0,25	0,27	[167]
Methanol, Rotterdam Spot Markt ( II / 2002 )		0,74	-	0,24	-	[167]
Methanol aus Biomasse		1,15	-	0,37	-	[54]
Methanol aus Holz		1,71	-	0,55	-	[152]
Methanol aus Stroh		2,17	-	0,70	-	[152]
Methanol aus Miscanthusgras		1,91	-	0,61	-	[152]
Methanol aus Holz (Reststoffe)		1,21	1,71	0,39	0,55	[86]
Methanol aus Rohöl		1,04	-	0,33	-	[54]
Methanol aus Kohle		1,17	-	0,38	-	[54]
<b>DME (Dimethylether)</b>	<b>flüssig</b>	<b>0,77</b>		<b>0,25</b>		<b>diese Arbeit</b>
DME (Dimethylether)		0,70	-	0,22	-	[24]
<b>Bioethanol aus Zuckerrüben</b>	<b>flüssig</b>	<b>3,00</b>		<b>0,97</b>		<b>diese Arbeit</b>
Bioethanol aus Rüben, einschl. Transport		2,53	3,32	0,82	1,07	[56]
Bioethanol aus Weizen, einschl. Transport		3,21	4,18	1,03	1,34	[56]
Bioethanol USA		1,34	1,71	0,43	0,55	[218]
Bioethanol USA (landw. Abfallstoffe)		0,80	0,96	0,26	0,31	[218]
Bioethanol aus Zuckerrüben Deutschland		3,19	4,47	1,03	1,44	[152]
Bioethanol aus Weizen Deutschland		4,06	4,18	1,31	1,34	[152]
Bioethanol 100 aus Mais USA (mit und ohne Gutschriften und Fabriksubventionen)		1,88	0,89	0,61	0,29	[152]
Bioethanol 100 aus Zuckerrohr, Brasilien		0,89	-	0,29	-	[152]
Bioethanol aus Holz (Reststoffe)		1,79	2,07	0,58	0,67	[86]
Bioethanol		2,98	-	0,69	-	[102]
<b>RME (Rapsölmethylester)</b>	<b>flüssig</b>	<b>1,53</b>		<b>0,49</b>		<b>diese Arbeit</b>
RME, einschl. Transport		1,65	4,06	0,53	1,31	[56]
RME, einschl. Transport, Marge etwa 9%		2,06	-	0,66	-	[267]
RME (Verkaufspreis)		2,60	-	0,84	-	[78]
RME, derzeitige Produktionsmengen		1,04	1,35	0,33	0,44	[250]
RME, Ausweitung Produktionsmengen, sinkende Erlöse bei Rapsschrot und Glycerin		1,29	1,88	0,42	0,60	[250]
RME, Ausweitung Produktionsmengen, sinkende Erlöse, sinkende Verwaltungs-, Transportkosten		1,17	1,79	0,38	0,57	[250]
RME		1,87	-	0,60	-	[86]
RME		1,06	-	0,34	-	[102]
<b>Strom (Netzstrom, Haushalt)</b>	<b>-</b>	<b>4,00</b>		<b>1,29</b>		<b>diese Arbeit</b>
Strom (Haushalt) 1996		3,35	-	1,08	-	[49]
Strom (Haushalt) 1997		3,41	-	1,10	-	[49]
Strom (Haushalt) 1998		3,43	-	1,10	-	[49]

Tab. 7-48: Vergleich technischer Maßnahmen hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Minderung und Kosten (Referenz: Otto-Pkw, Ottomotor mit Saugrohreinspritzung)

Maßnahme	CO <sub>2</sub> -Reduktion NEFZ	Mehrkosten	Anmerkungen
<b>Betriebsstoffe</b>			
Leichtlaufreifen	3% - 5%	- € - 20 €	Reifensatzwechsel 20.000-60.000 km
Leichtlauföl	2% - 5%	- € - 30 €	Ölwechselintervall 30.000-50.000 km
<b>Motortechnische Maßnahmen</b>			
Benzin-Direkteinspritzung	10% - 13%	150 € - 200 €	DI, Lambda = 1 und AGR
Drall, variabler Einlasskanal	5% - 7%	- € - 20 €	z.B. Twinport
Elektromech. variabler Ventiltrieb	15% - 23%	100 € - 150 €	
Hubvolumenred. -40%, Aufladung	10% - 15%	- € - 130 €	Wesentliche Kostengröße: Aufladung
<b>Getriebetechnische Maßnahme</b>			
Stufenloses Getriebe	5% - 11%	84 € - 196 €	Mehrkosten 30-70%
<b>Gewichtsreduktion durch neue Werkstoffe im Rohbau (Angaben je Reduktion um 100 kg)</b>			
Aluminium	5% - 8%	- € - 375 €	max. 14-21% vom Leergewicht <sup>1)</sup>
Kohlefaser verstärkte Polymere	5% - 8%	58 € - 1.800€	max. 16-23% vom Leergewicht <sup>1)</sup>
<b>Wechsel der Antriebsvarianten</b>			
Dieselantrieb statt Ottomotor	8% - 13%	154 € - 616 €	Mehrkosten 10-40%, Verbrauchsvorteil 20-25%, CO <sub>2</sub> -Nachteil des Diesel
Start/Stopp-System, milder Hybrid	8% - 10%	800 € - 960 €	z.B. Honda <i>Insight</i>
<b>Zusammenfassung</b>			
A: Max. Optimierung Ottomotor	35% - 59%	84 € - 1.266€	LL-Reifen <sup>2)</sup> , LL-Öl, Drall, Aufladung, stufenloses Getriebe, -200 kg (Al)
B: Schwerpunkt Benzin DI	30% - 49%	234 € - 1.316€	LL-Reifen <sup>2)</sup> , LL-Öl, Benzin-DI, stufenloses Getriebe, -200 kg (Al)
C: Schwerpunkt Diesel-DI	23% - 41%	238 € - 1.357€	LL-Reifen <sup>2)</sup> , LL-Öl, Diesel-DI, stufenloses Getriebe, -100 kg (Al)
D: Schwerpunkt Hybridantrieb	23% - 38%	800 € - 1.505€	LL-Reifen <sup>2)</sup> , LL-Öl, Hybridantrieb, -100 kg (Al)
E: Kostengünstigste Optimierung	20% - 31%	- € - 320 €	LL-Reifen <sup>2)</sup> , LL-Öl, Drall, Aufladung
<sup>1)</sup> Max. Gewichtseinsparung 200 kg bei Kleinwagen-Pkw <sup>2)</sup> 4 Sätze LL-Reifen, 3 Wechsel LL-Öl			

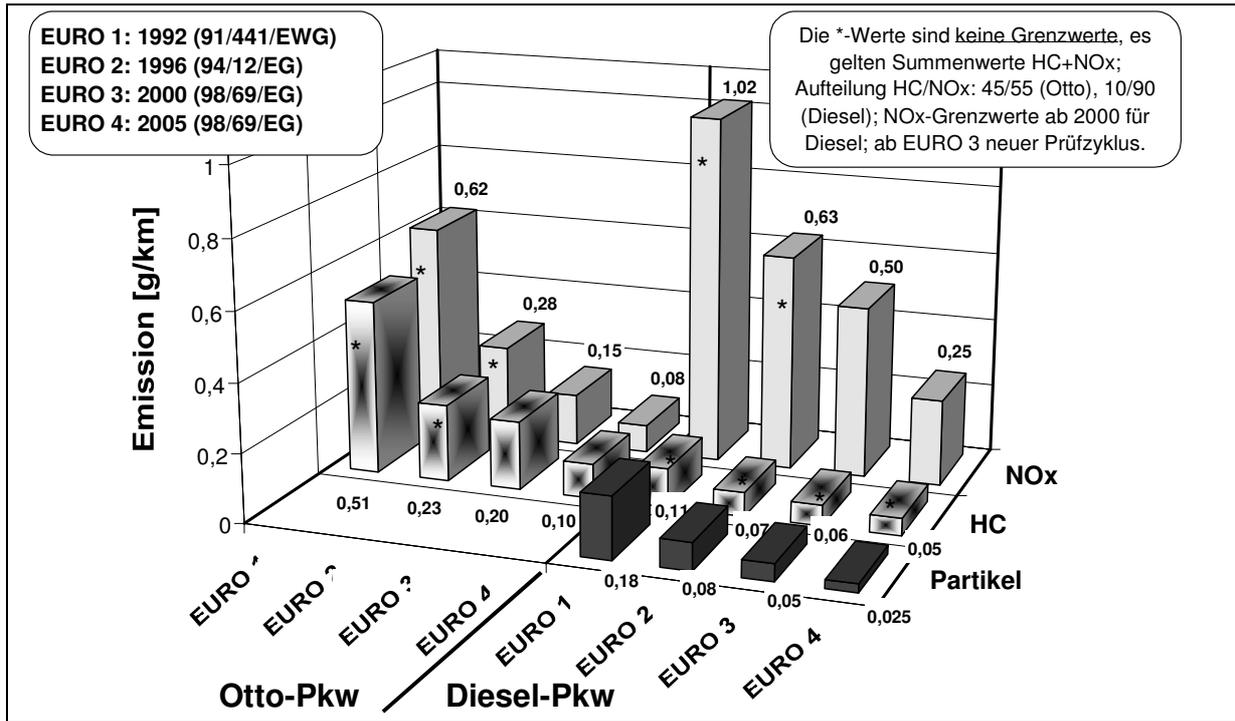


Abb. 7-1: Gegenüberstellung der absoluten Verhältnisse der Grenzwertstufen von Otto- und Diesel-Pkw ([2], [5], [6])

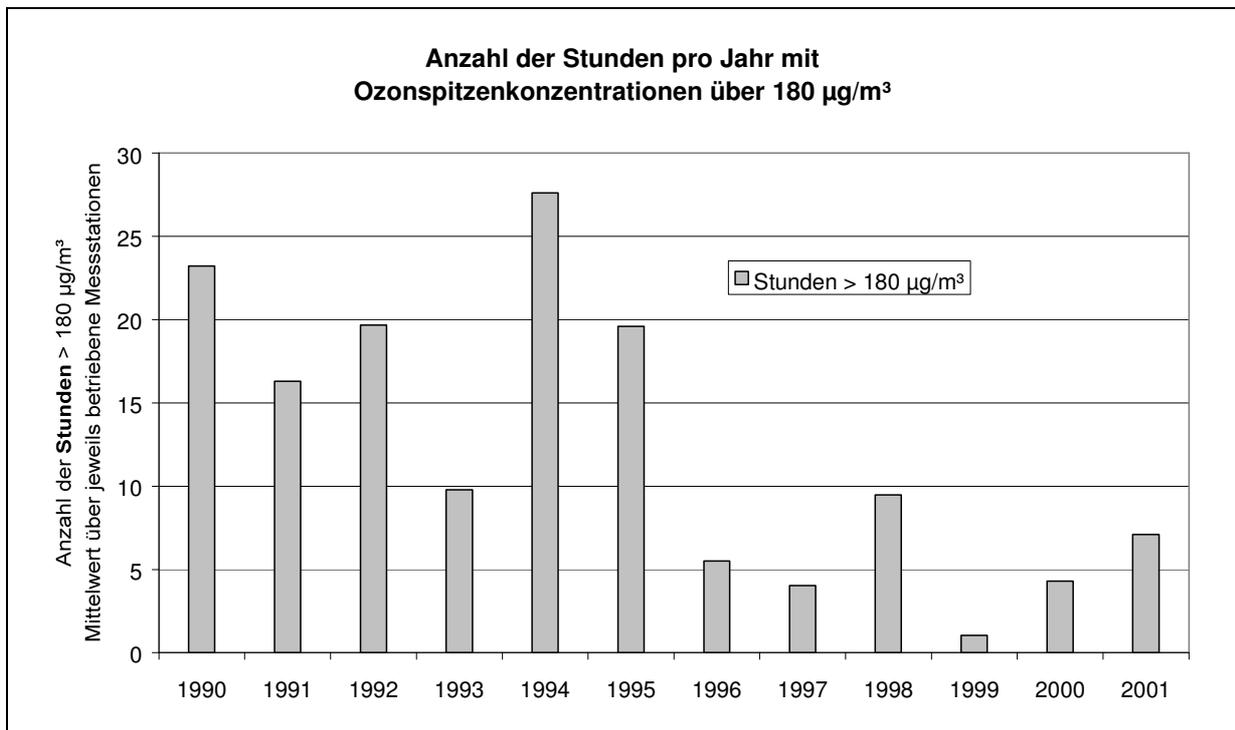


Abb. 7-2: Zahl der Stunden mit Ozonkonzentrationsüberschreitungen von 180 µg/m³, im Mittel über die jeweils betriebenen Messstellen [260]

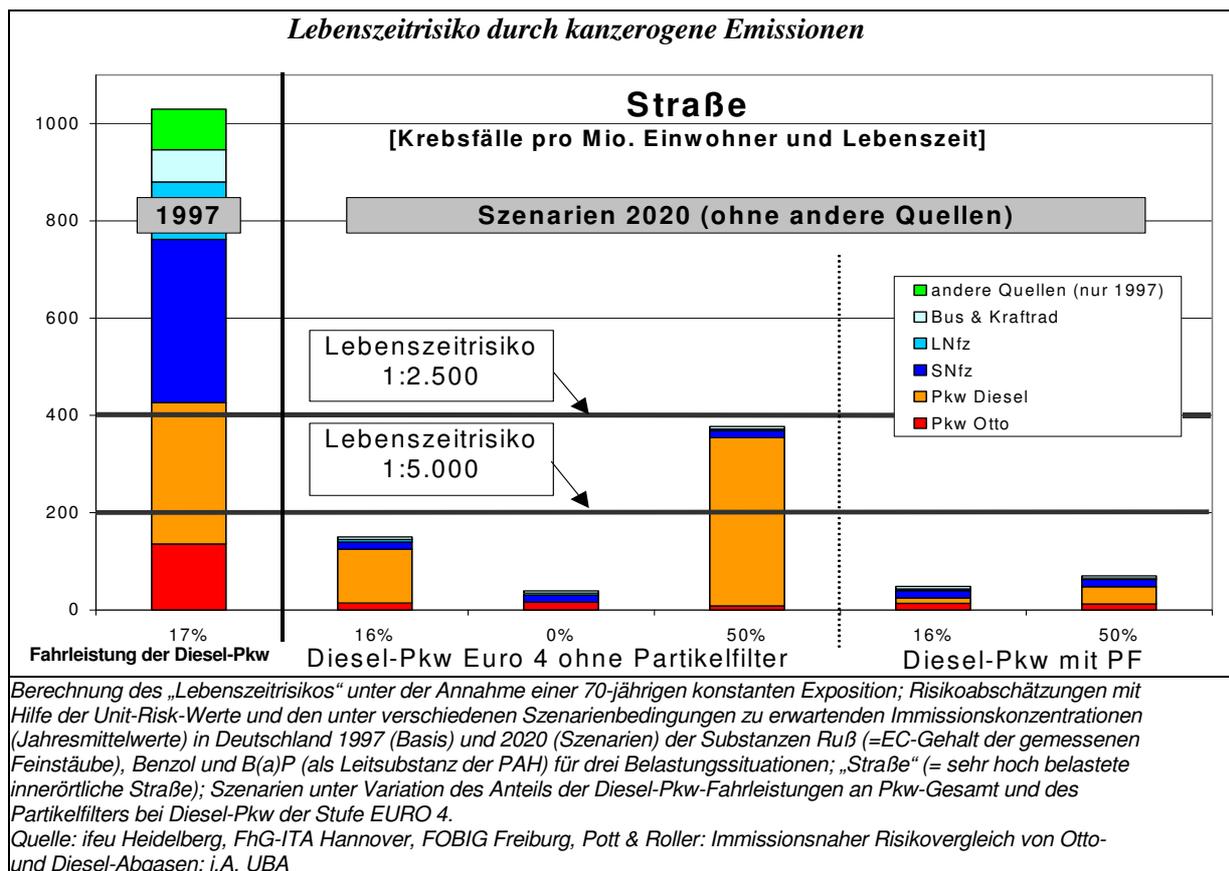


Abb. 7-3: Berechnung und Vergleich des Lebenszeitrisikos durch kanzerogene Emissionen aus dem Straßenverkehr 1997 und 2020 ([125], [128])

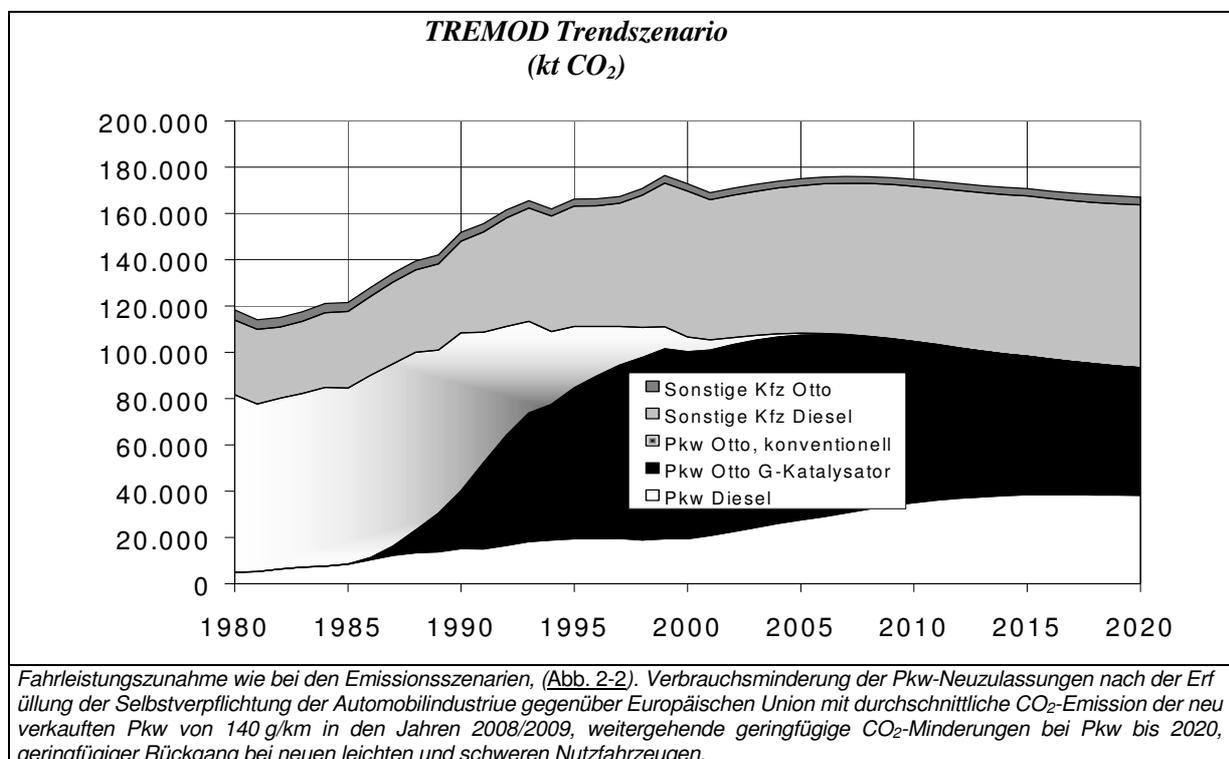


Abb. 7-4: Entwicklung der Kohlendioxidemissionen im deutschen Straßenverkehr 1980 – 2020 auf der Basis der TREMOD Trendszenarien ([123], [125], [127][127])

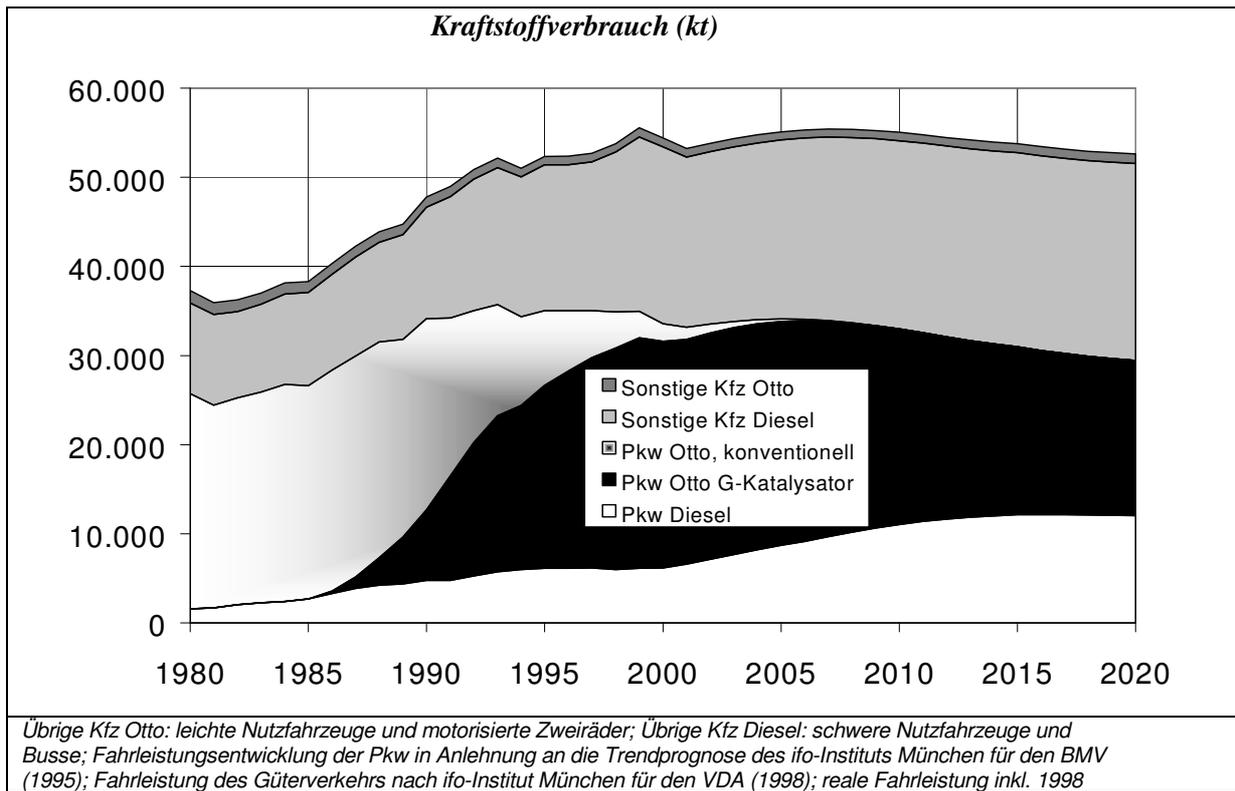


Abb. 7-5: Entwicklung des Kraftstoffverbrauches im deutschen Straßenverkehr 1980 – 2020 auf der Basis der TREMOD Trendszenarien ([123], [127][127])

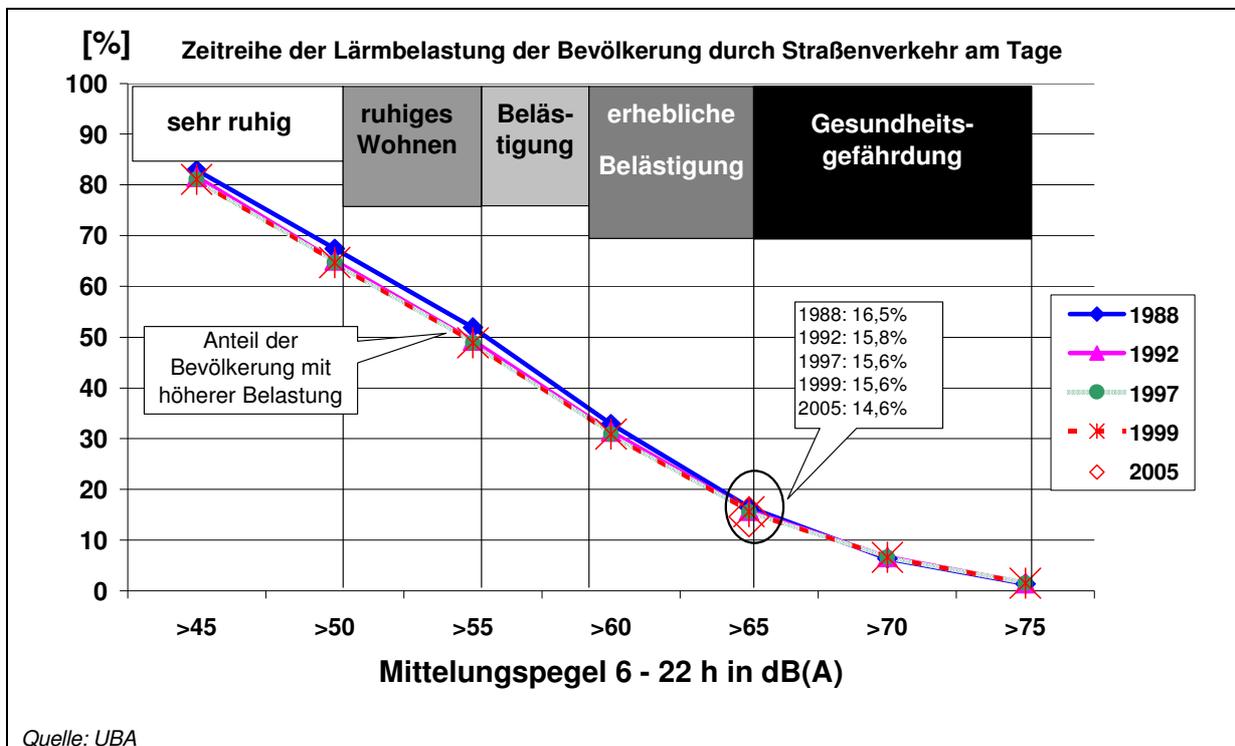


Abb. 7-6: Zeitliche Prognose der Lärmbelastungen durch den Straßenverkehr

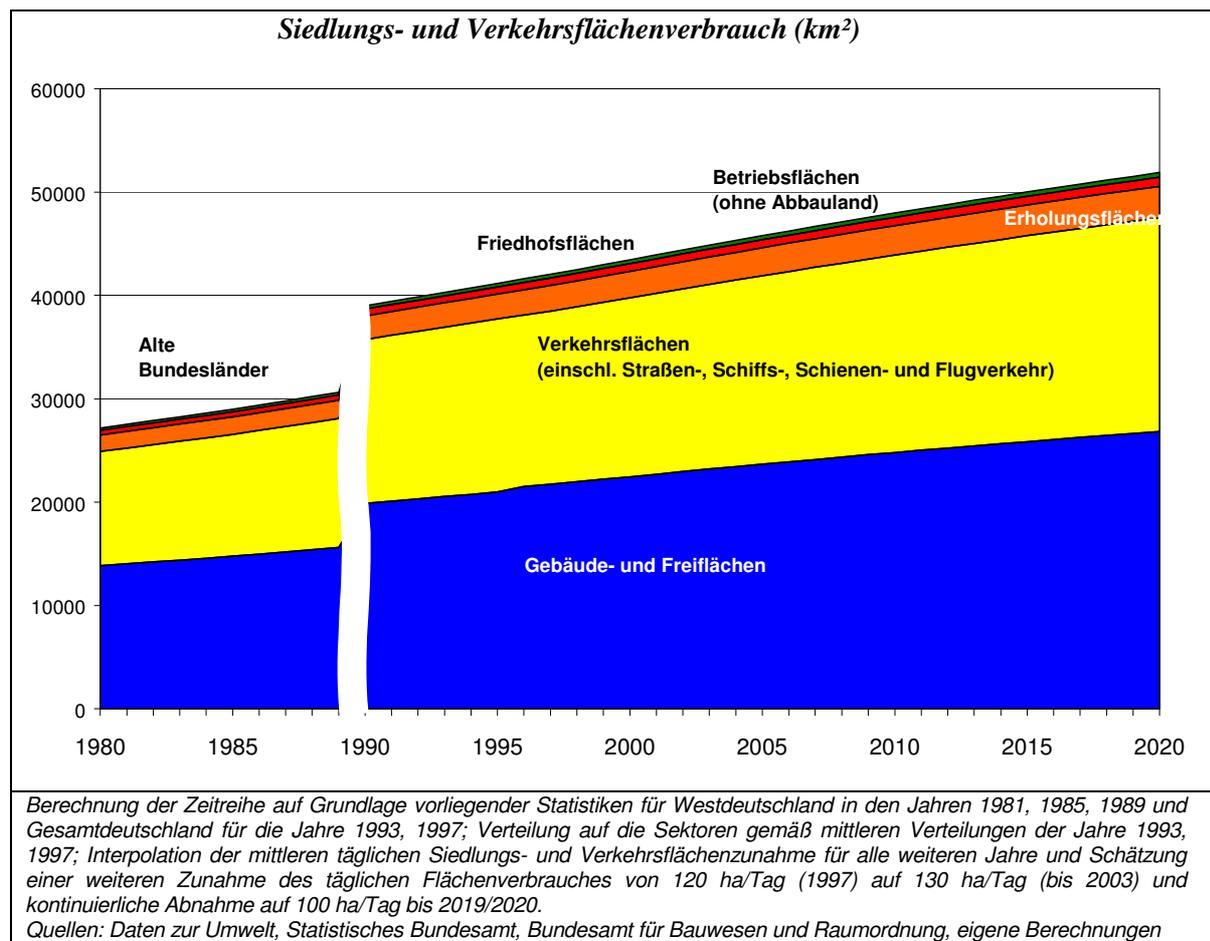


Abb. 7-7: Entwicklung des Flächenverbrauches in Deutschland 1980 – 2020 auf der Basis vorliegender Statistiken und eigener Schätzungen ([38], [221])

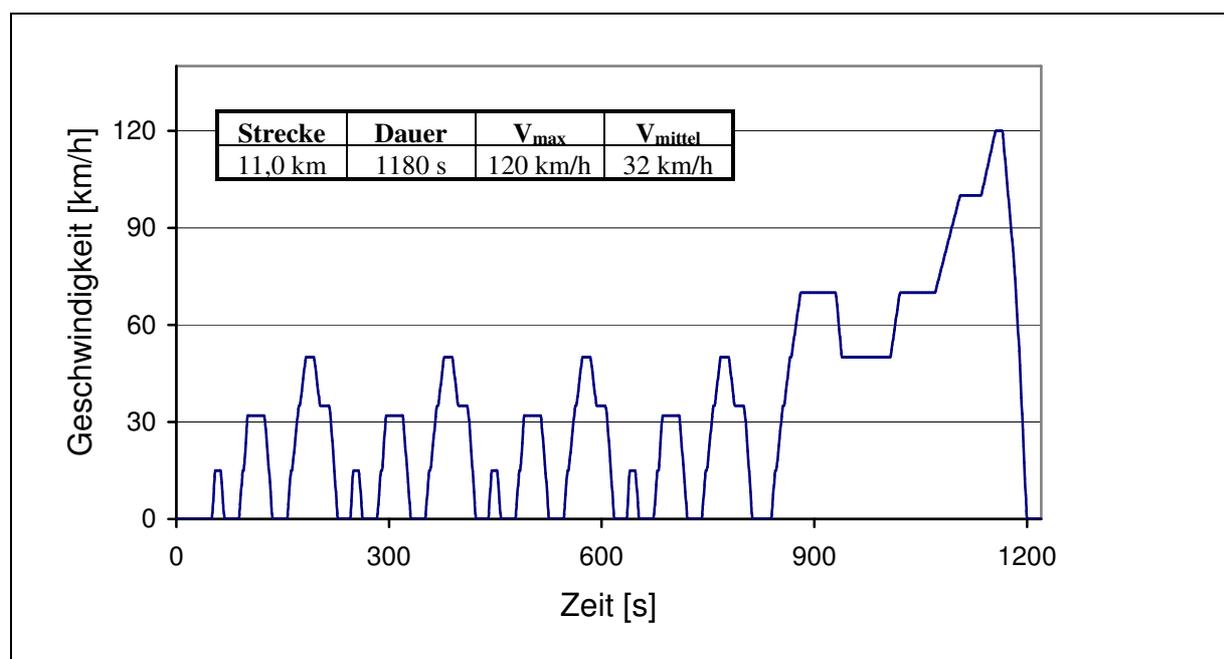


Abb. 7-8: Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf des NEFZ (Anforderungen nach 98/69/EG)

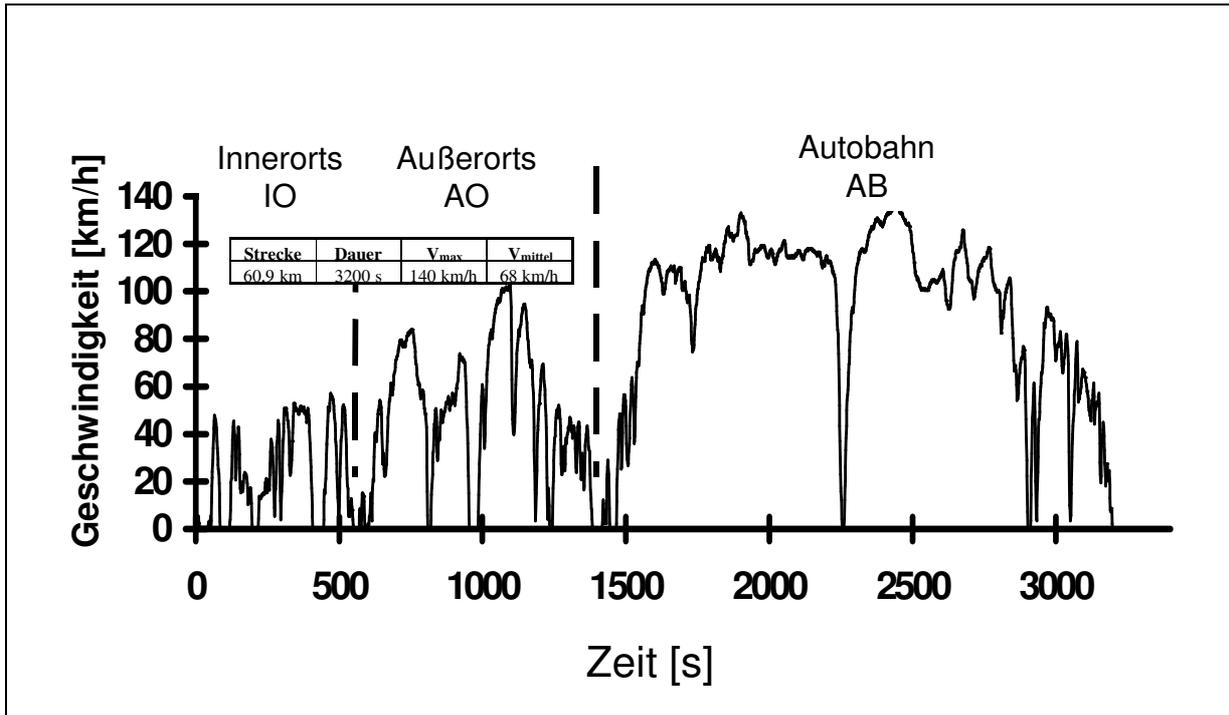


Abb. 7-9: Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf des HYZEM

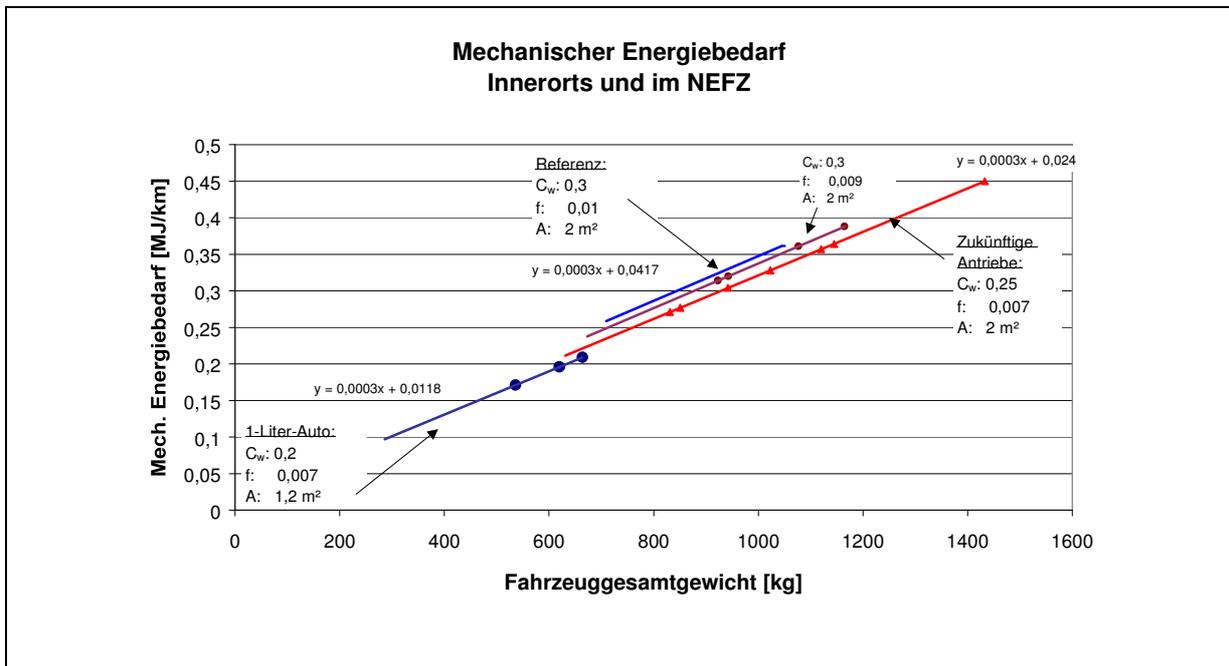


Abb. 7-10: Mechanischer Energiebedarf für Pkw unterschiedlicher Auslegung, Innerorts und im NEFZ [77]

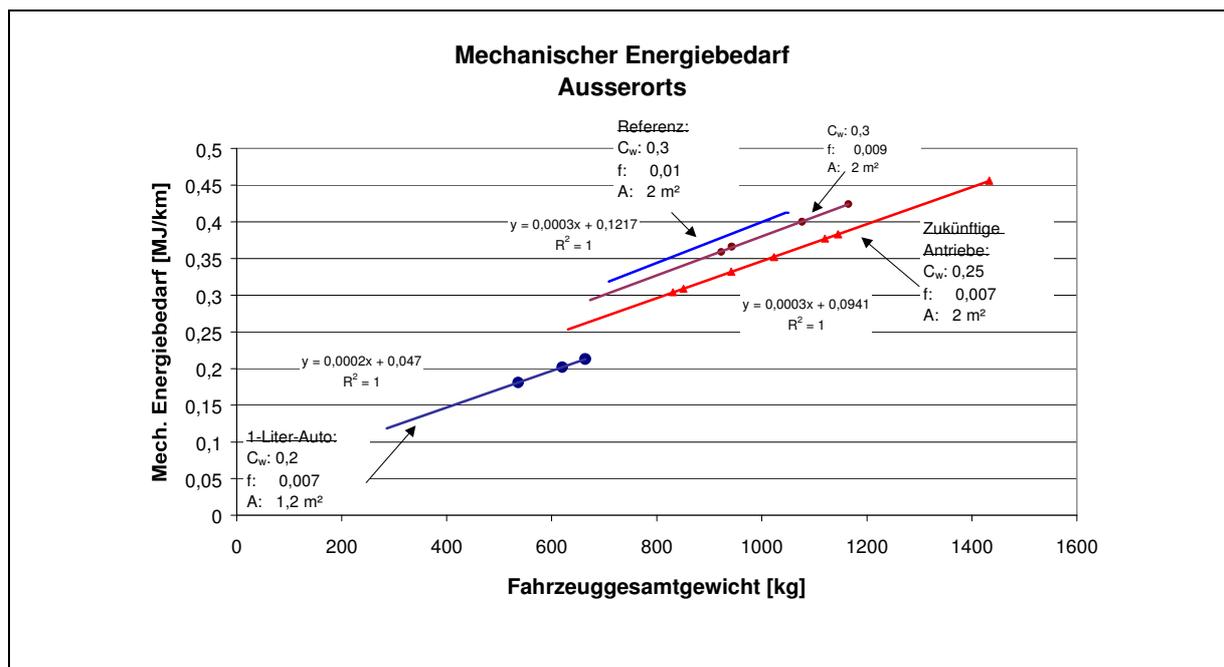


Abb. 7-11: Mechanischer Energiebedarf für Pkw unterschiedlicher Auslegung, Außerorts [77]

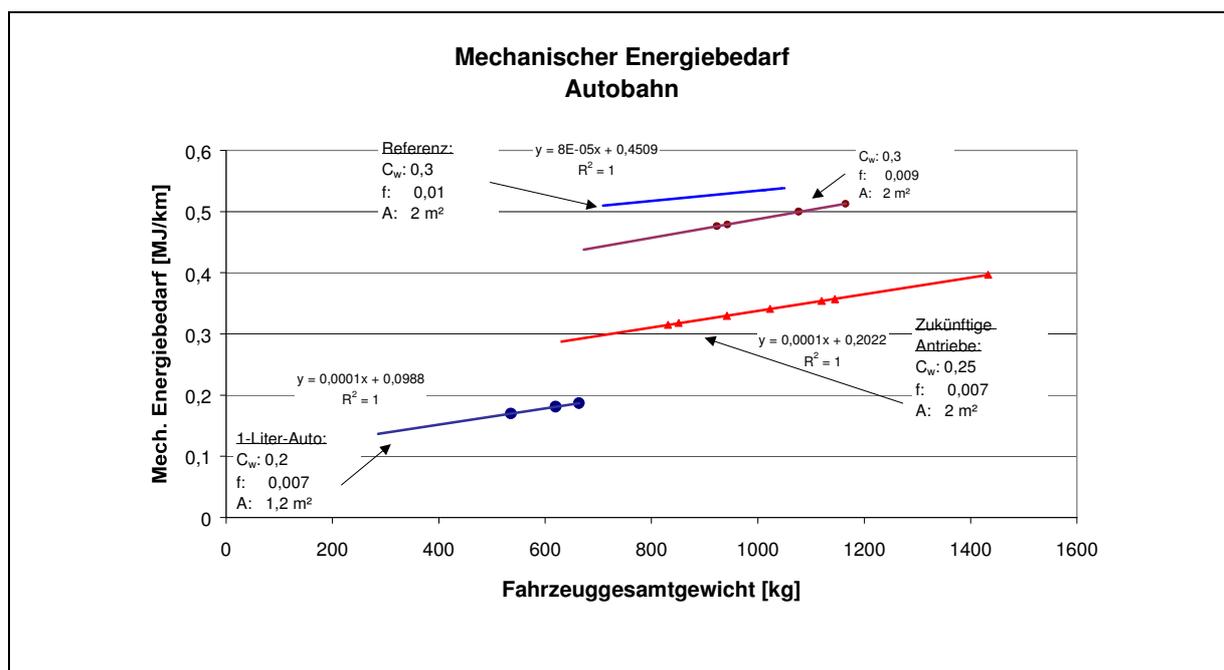


Abb. 7-12: Mechanischer Energiebedarf für Pkw unterschiedlicher Auslegung, Autobahn [77]

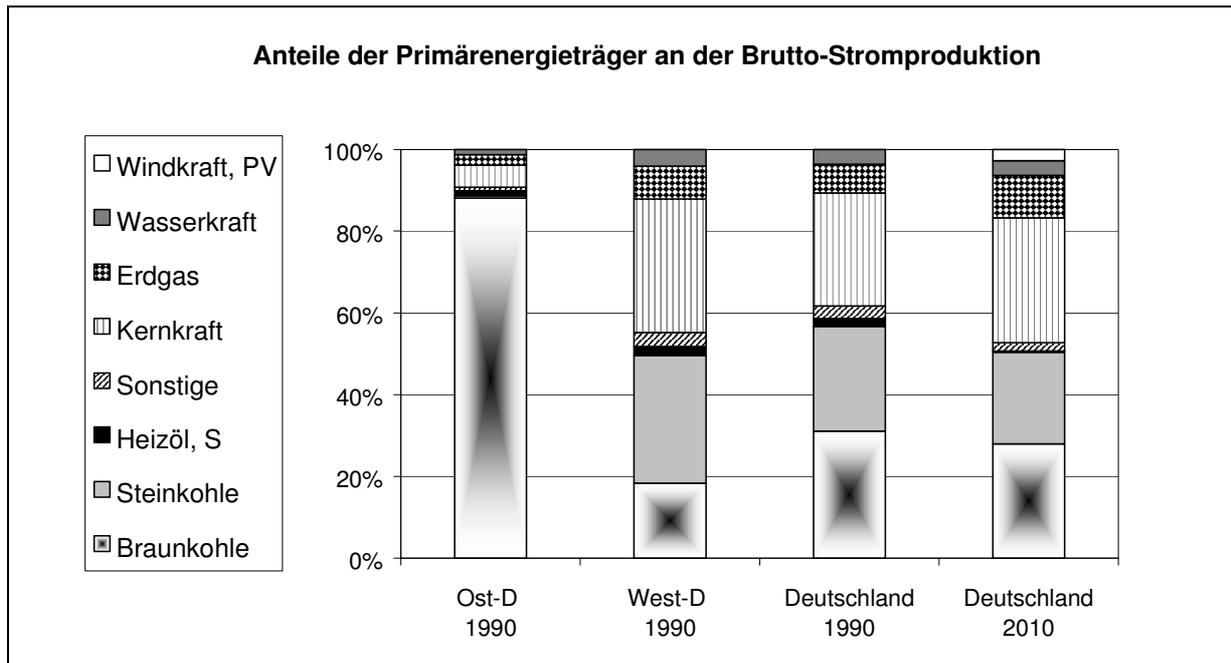


Abb. 7-13: Struktur der Brutto-Stromproduktion in Deutschland (nach [122], [142])

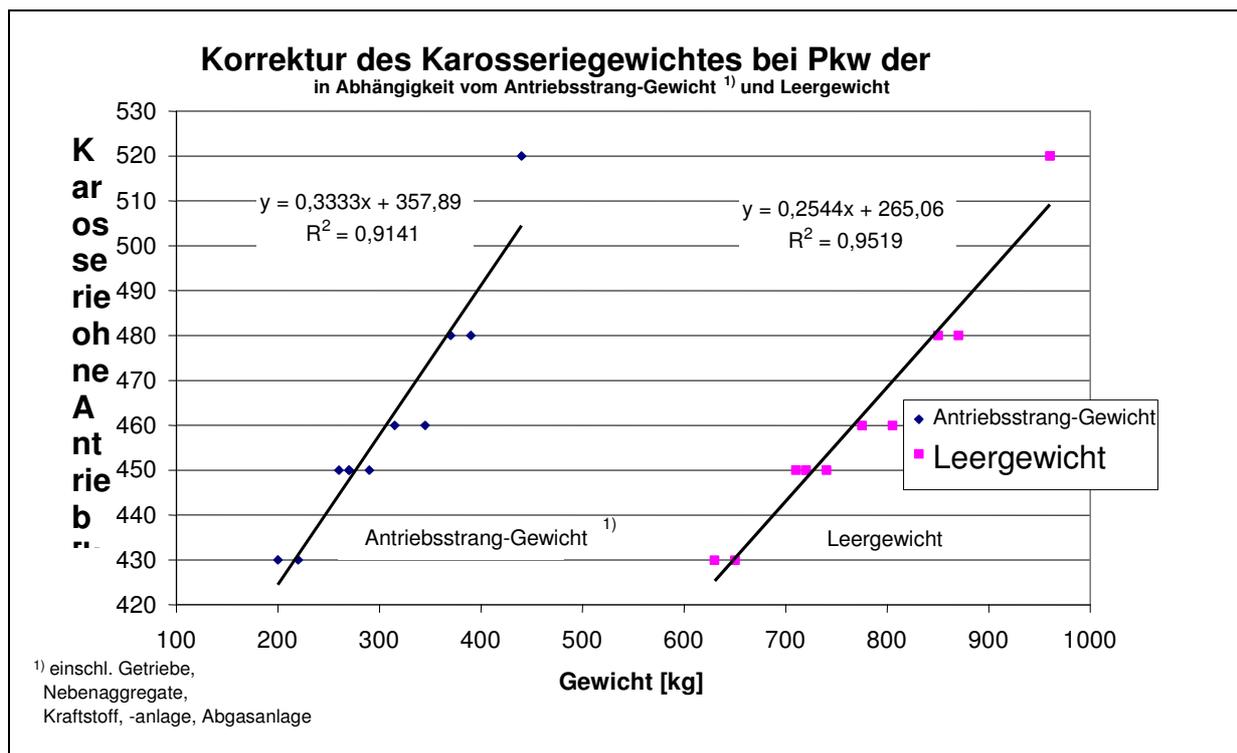


Abb. 7-14: Korrektur des Karosseriegewichtes in Abhängigkeit von Antriebsstranggewicht und Leergewicht (Karosserie, Antrieb) eines Pkw der Kleinwagenklasse (nach [278])

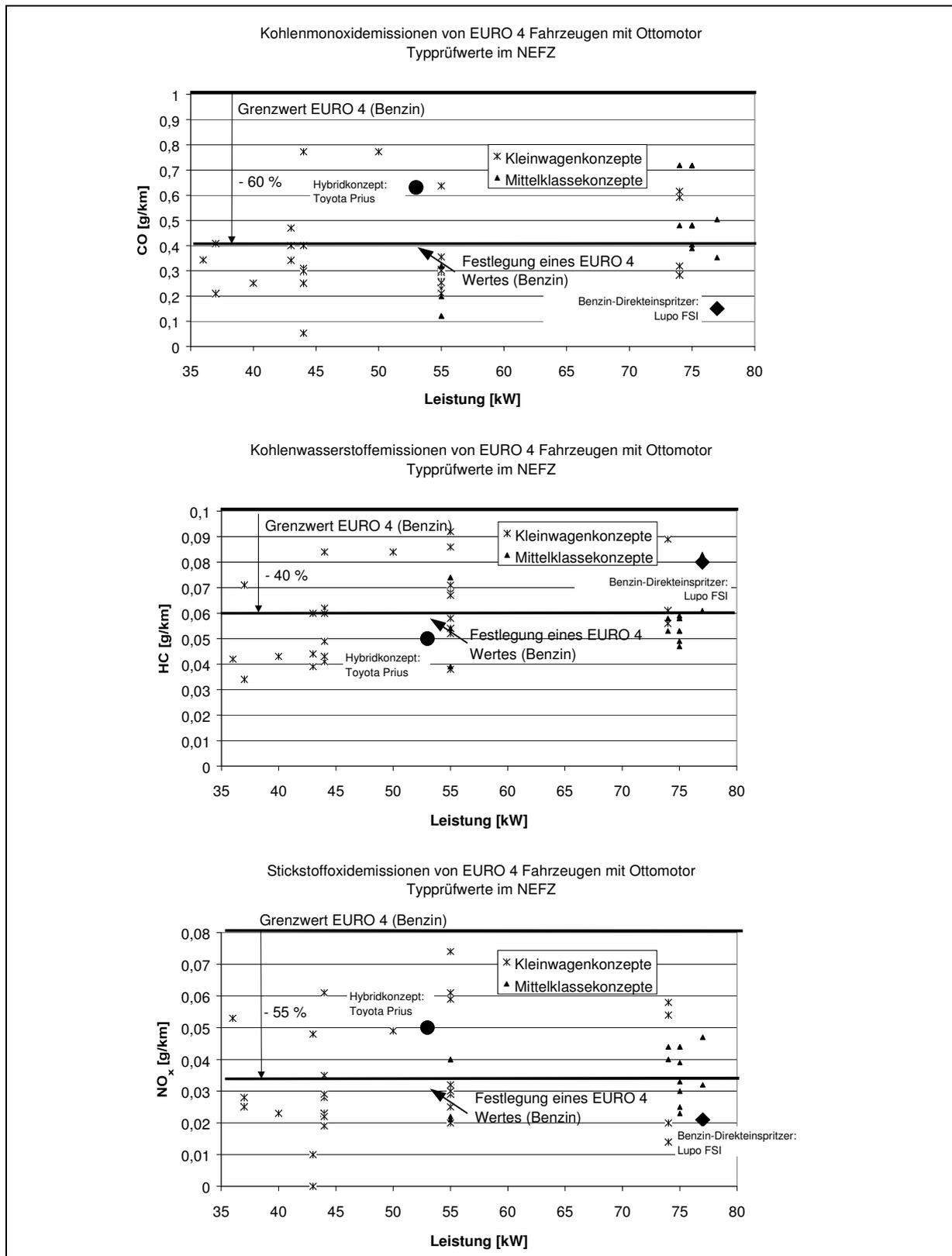


Abb. 7-15: Vergleich unterschiedlicher Emissionswerte und Festlegung der Emissionsfaktoren von Otto-Pkw der Grenzwertstufe EURO 4B ([145], [146])

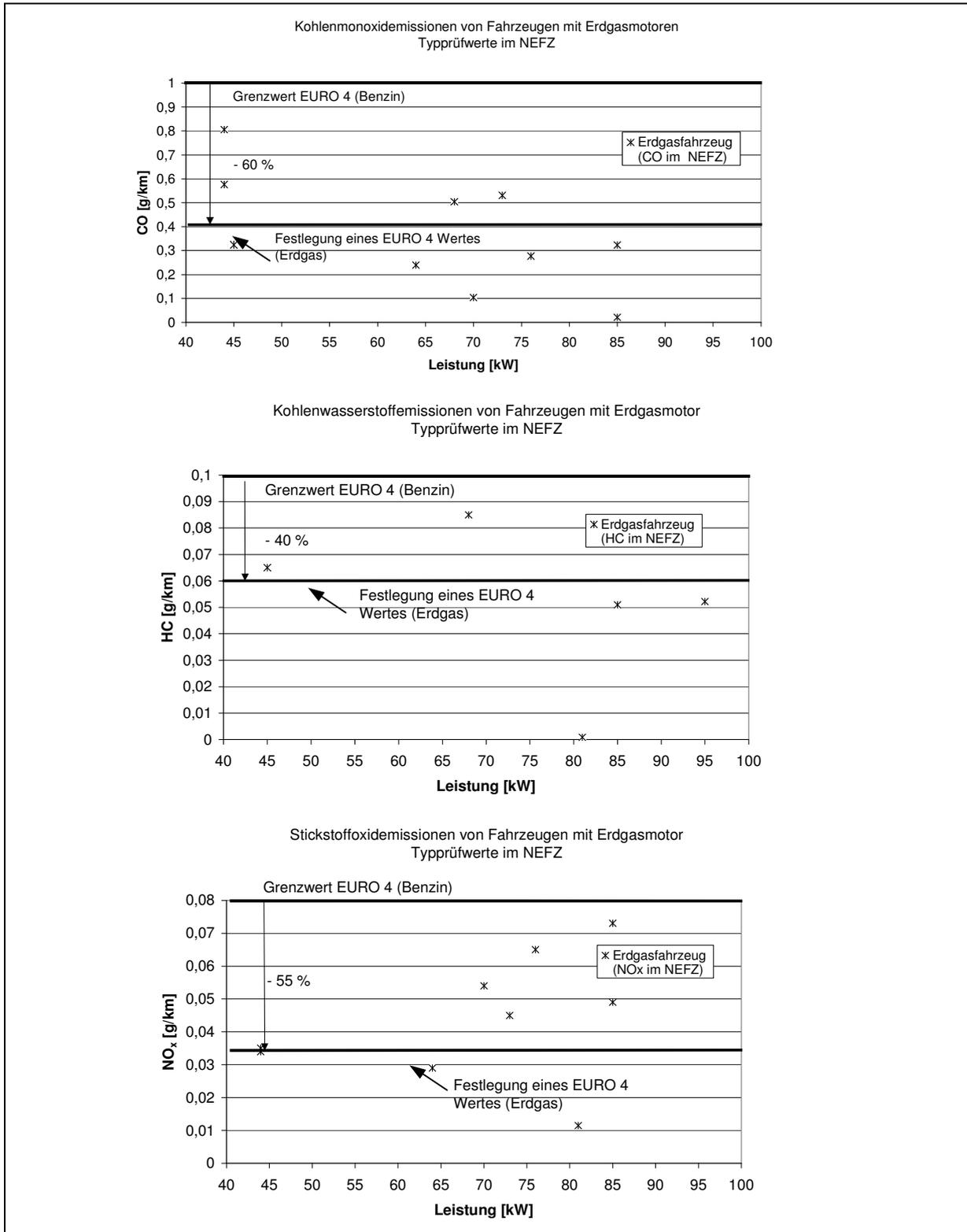


Abb. 7-16: Gegenüberstellung der Messwerte von Erdgas-Pkw der Grenzwertstufe EURO 4B und Festlegung der Emissionsfaktoren für Modellierungen [46]

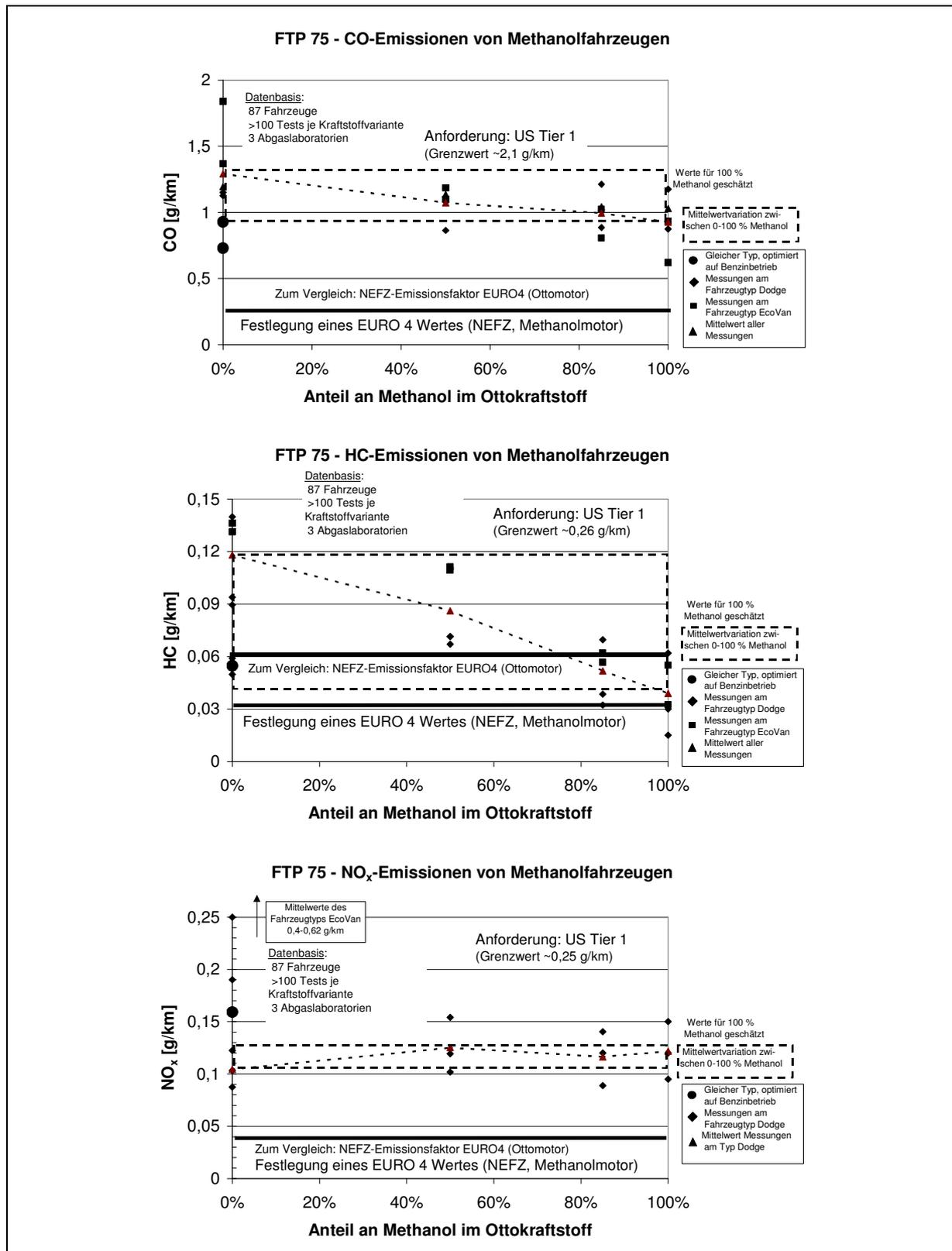


Abb. 7-17: Ermittlung von Emissionsfaktoren limitierter Schadstoffe für Fahrzeuge mit Methanolverbrennungsmotor auf Basis vorliegender Messungen [170]

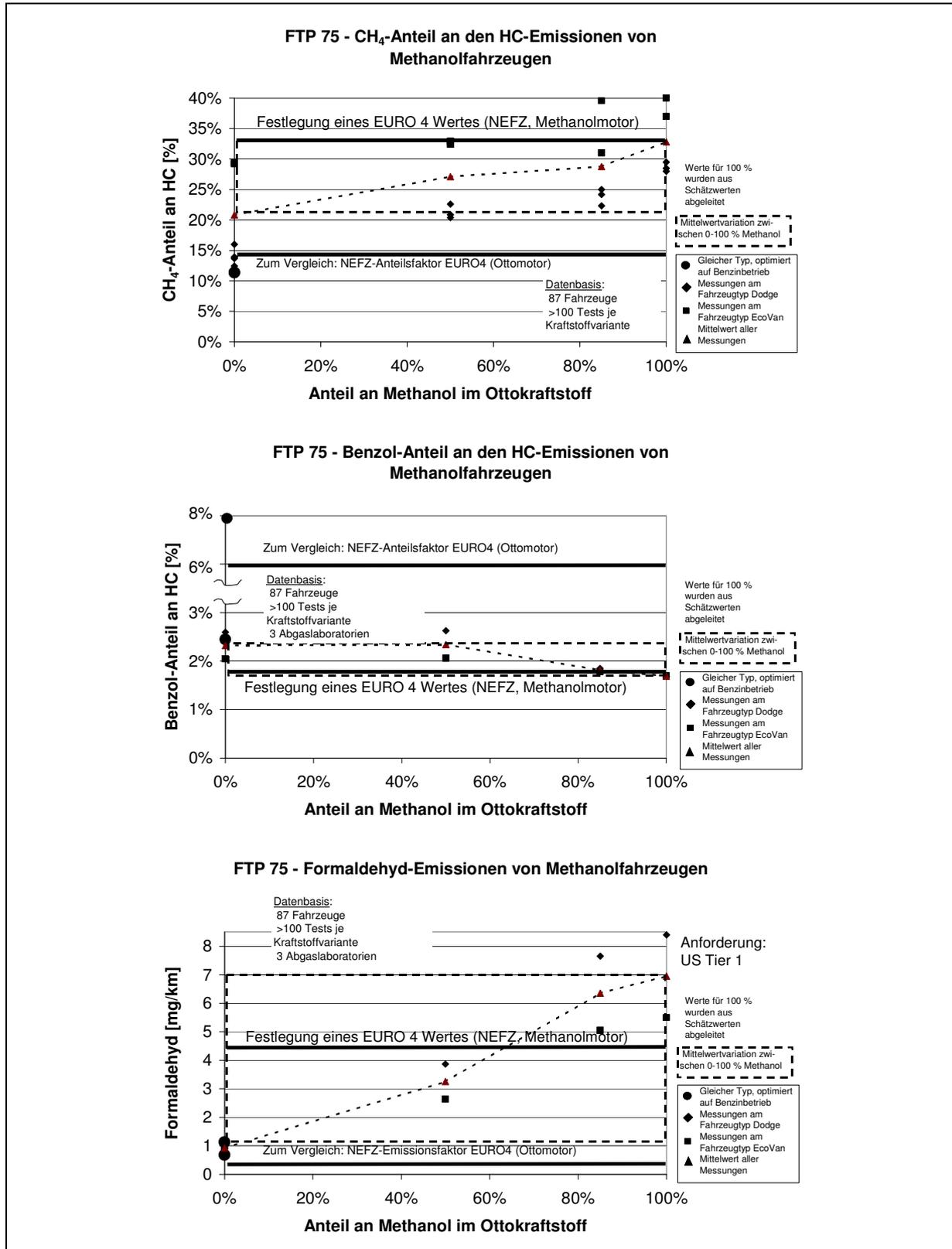


Abb. 7-18: Ermittlung relativer Anteile nicht-limitierter Emissionen an Kohlenwasserstoffemissionen für Fahrzeuge mit Methanolverbrennungsmotor [170]

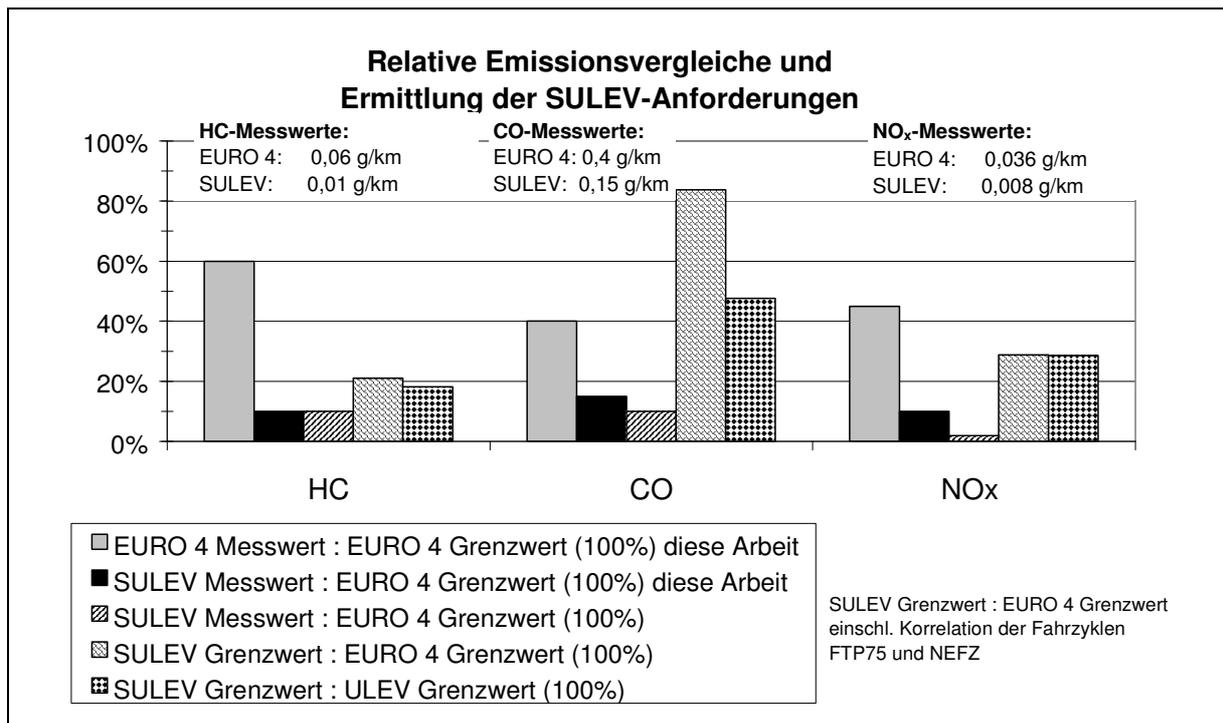


Abb. 7-19: Ableitung der erforderlichen und technisch möglichen Minderungsfaktoren des SULEV-Fahrzeuges ([154], [176], [237])

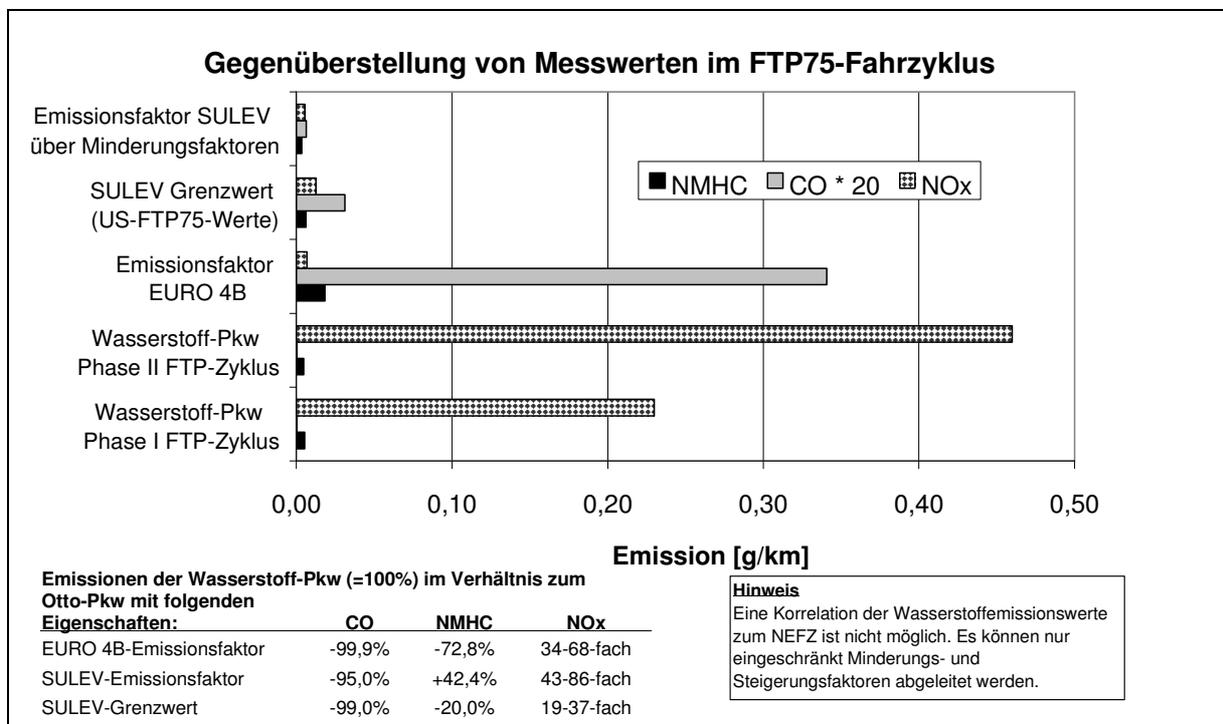


Abb. 7-20: Ermittlung von Minderungs- und Anstiegsfaktoren für Wasserstoff-Pkw mit Verbrennungsmotoren ([94], [237])

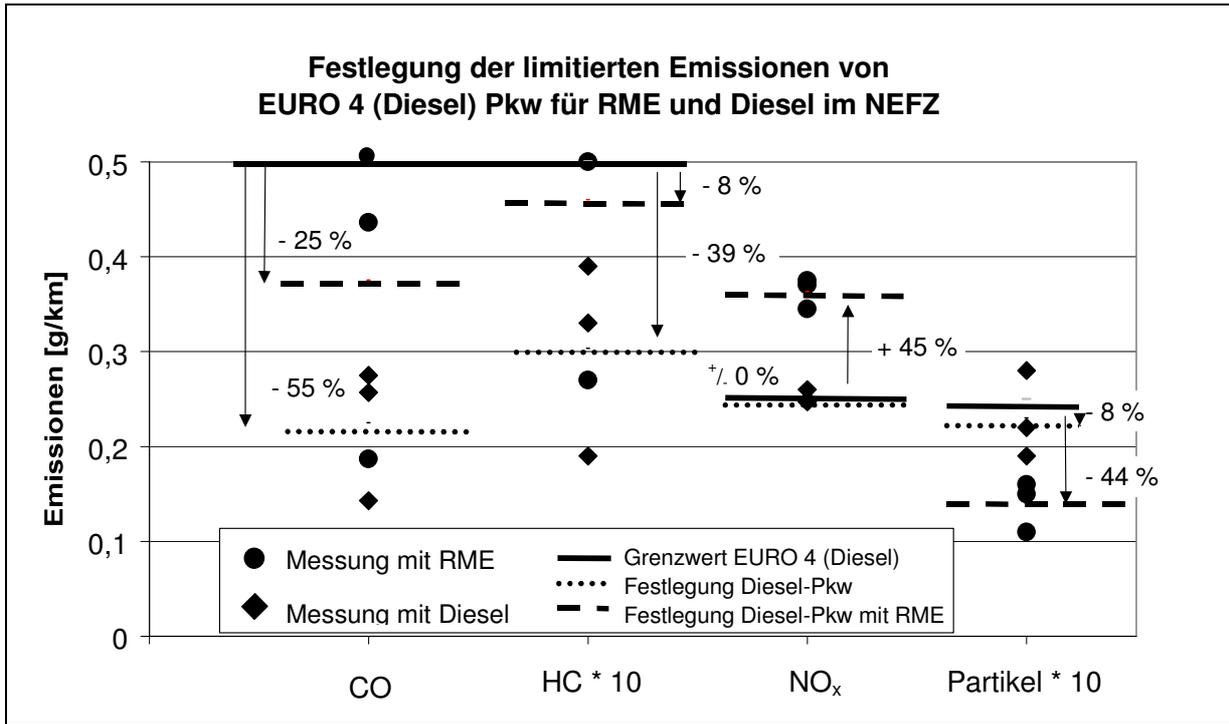


Abb. 7-21: Gegenüberstellung der Messwerte von Diesel-Pkw der Grenzwertstufe EURO 4 und Festlegung der Emissionswerte für Modellierungen im Diesel- und RME-Betrieb ([213])

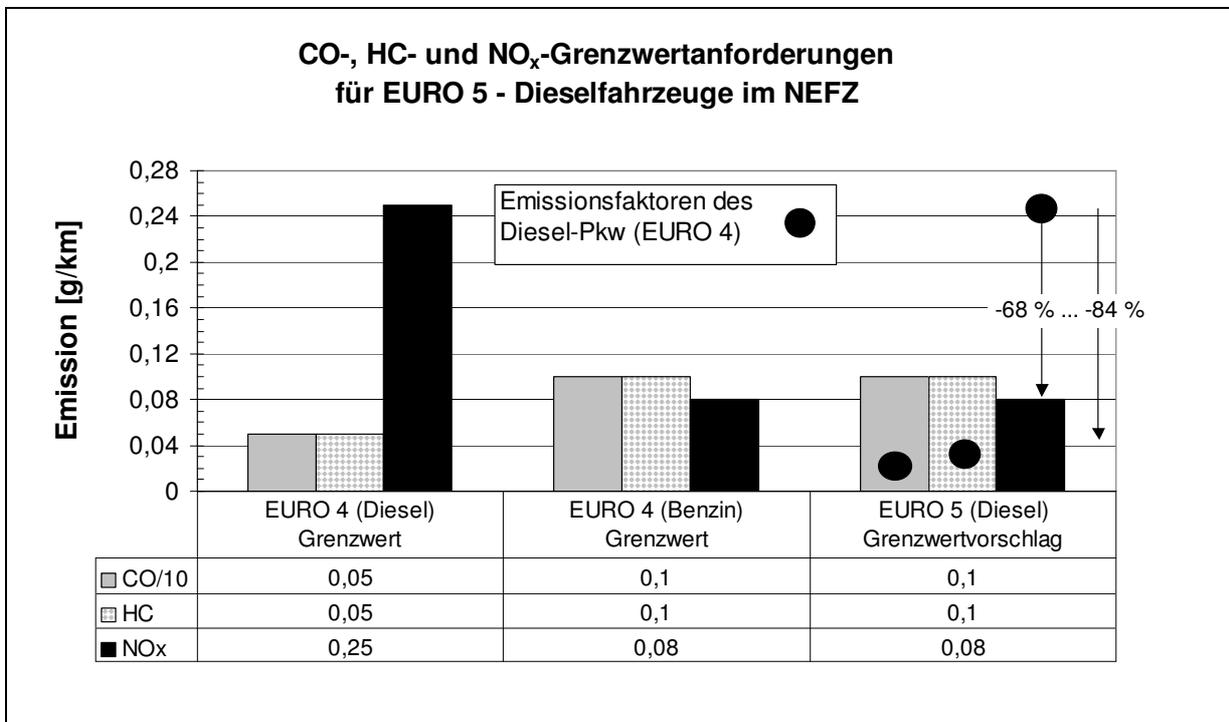


Abb. 7-22: Anforderungen an CO-, HC- und NO<sub>x</sub>-Emissionsminderungen für EURO 5 Diesel-Pkw und Darstellung der verwendeten Emissionsfaktoren von EURO 4 Pkw([16], [36], [122], [204], [243])

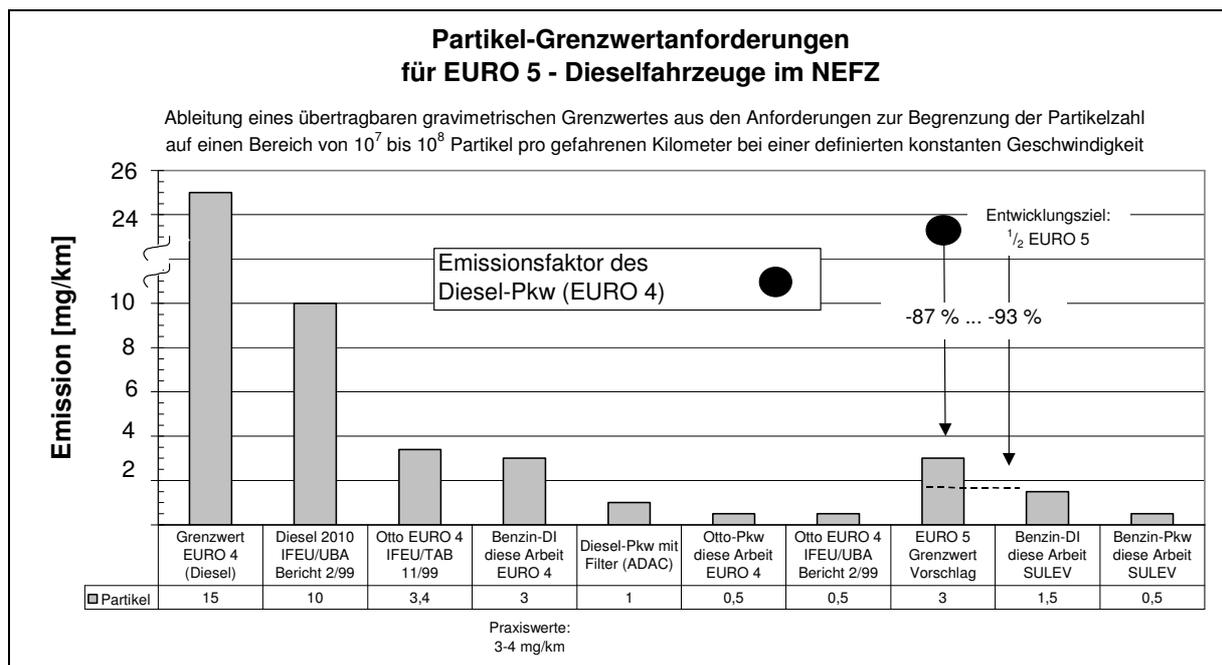


Abb. 7-23: Anforderungen an Partikelemissionsminderungen für EURO 5 Diesel-Pkw und Darstellung der verwendeten Emissionsfaktoren ([16], [36], [122], [204], [243])

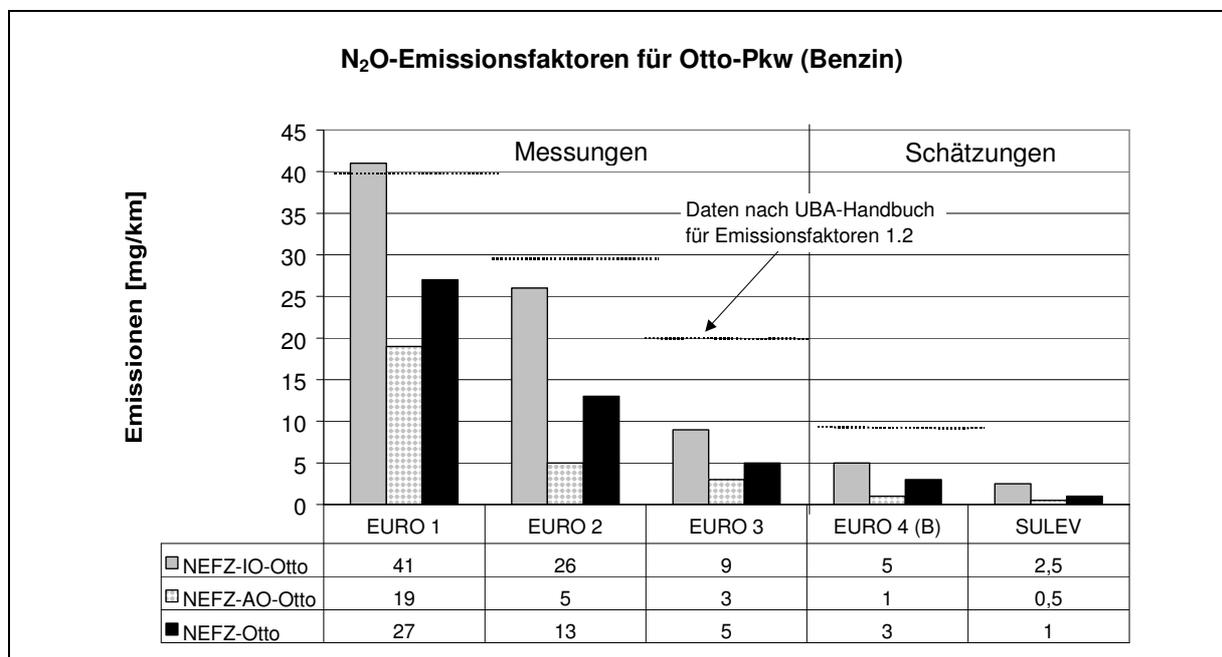


Abb. 7-24: Ermittlung der N<sub>2</sub>O-Emissionen von Otto-Pkw (Messungen [227], Schätzungen)

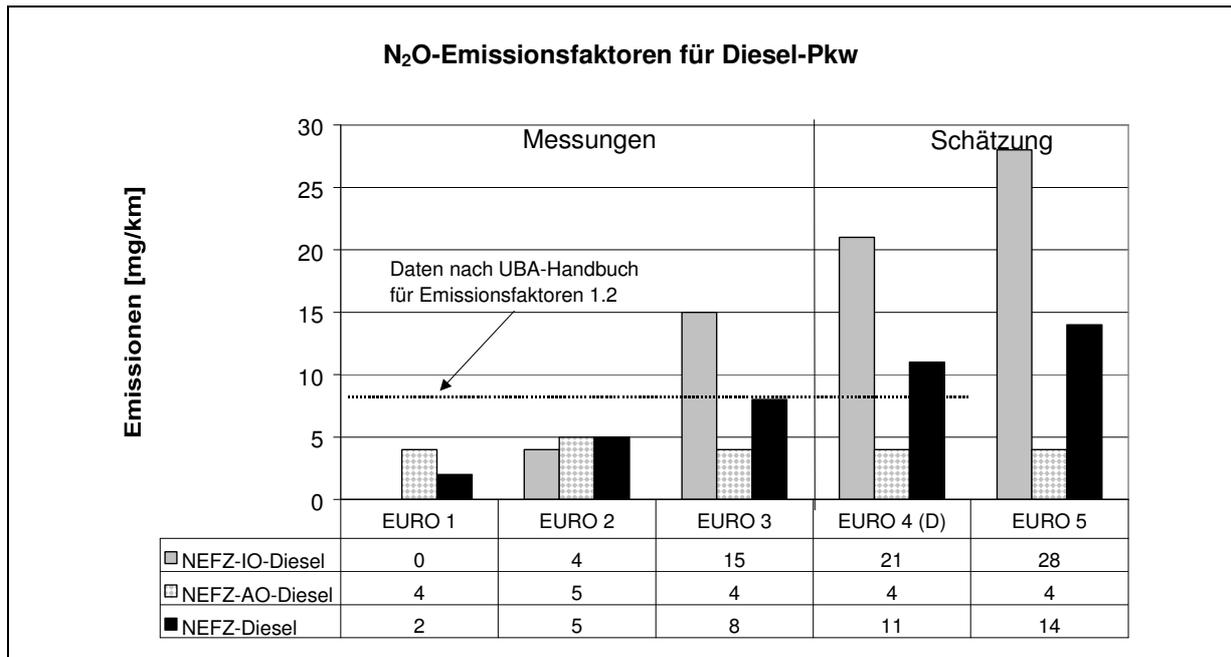


Abb. 7-25: Ermittlung der N<sub>2</sub>O-Emissionen von Diesel-Pkw (Messungen [227], Schätzungen)

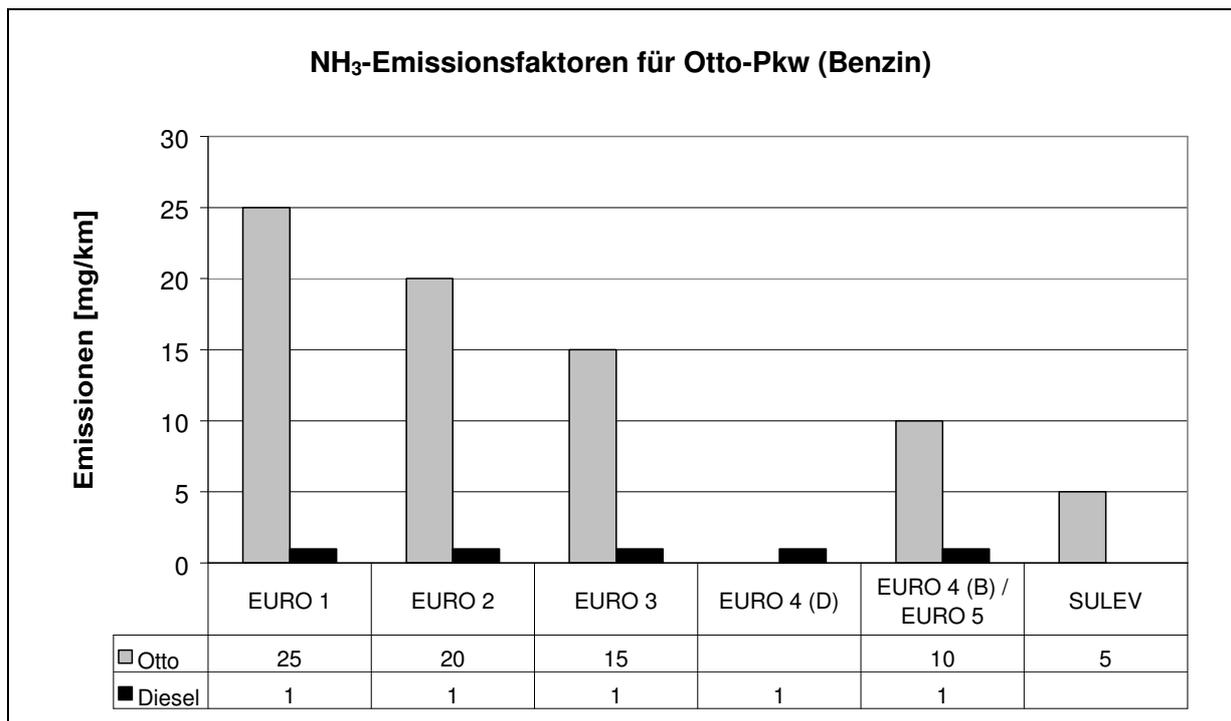


Abb. 7-26: Ermittlung der NH<sub>3</sub>-Emissionen von Pkw [137]

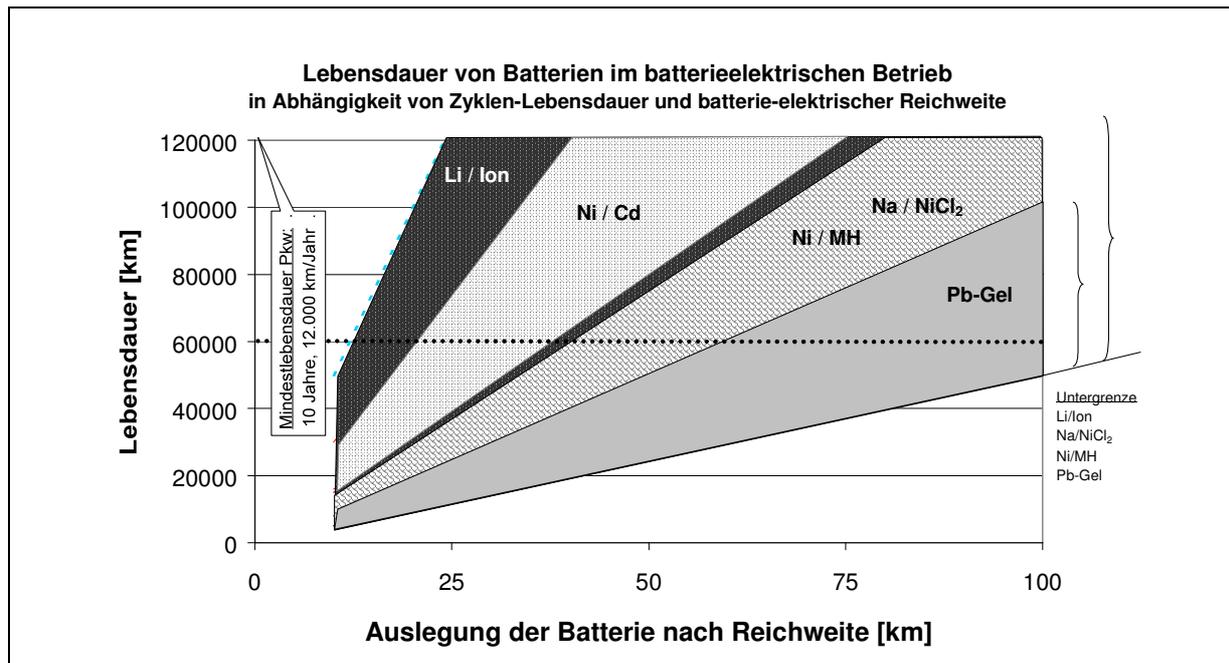


Abb. 7-27: Annahmen für unterschiedliche Lebensdauern von Batterien in Abhängigkeit von der Zyklenfestigkeit und der Reichweite des Fahrzeuges (eigene Berechnungen)

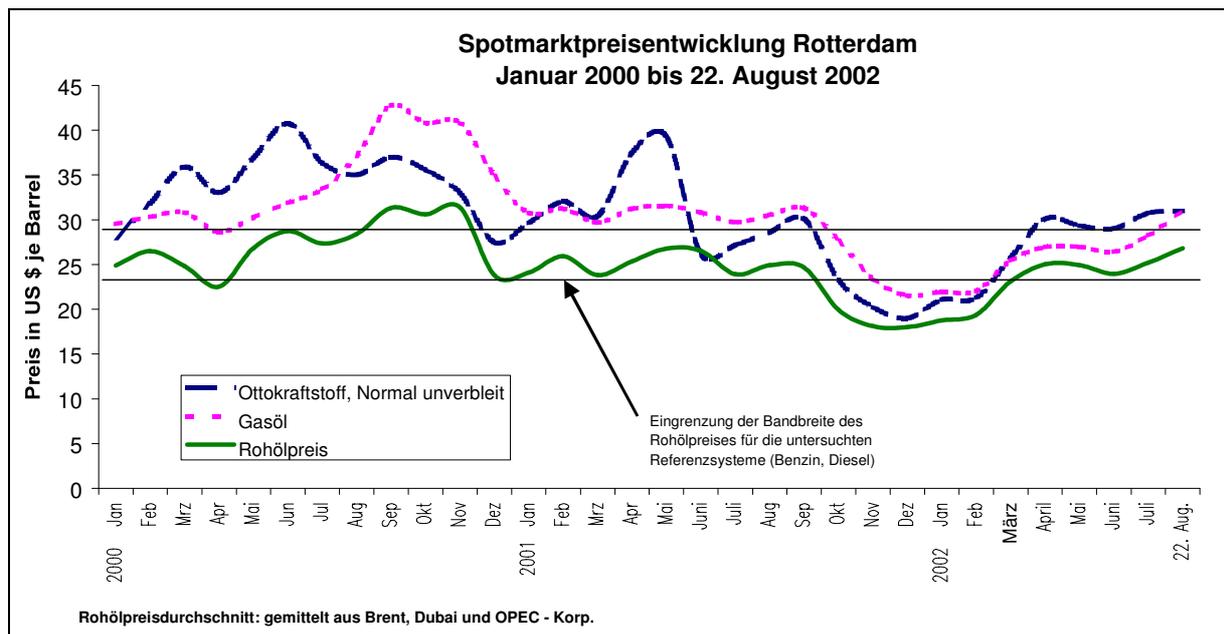


Abb. 7-28: Rohöldpreisentwicklung

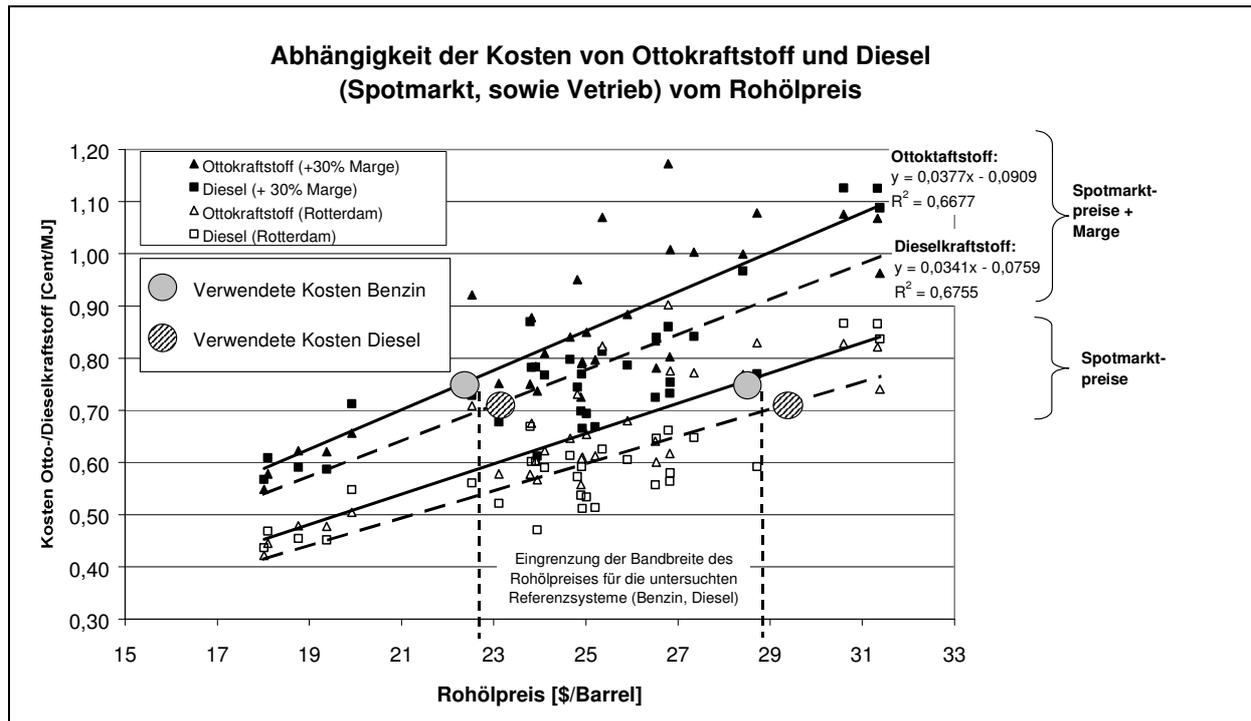


Abb. 7-29: Einordnung der verwendeten Herstellungskosten (Benzin, Diesel) zur Rohölpreisentwicklung

Tab. 7-49: Übersicht der untersuchten Fahrzeugvarianten

Lfd.-Nr.	Fahrzeug-Nr.	Treibstoff-Nr.	Abkürzung des Antriebes	Abgas-Mindeststandard	Erläuterungen zum Antrieb	Treibstoff	Erläuterung zum Treibstoff
1	1	1	Ref. VKM-Otto	EURO 4B	Referenz Otto 2000	Benzin	Ottokraftstoff
2	2	1	Ref. VKM-Otto DI	EURO 4B	wie 1: Direkteinspritzung	Benzin	Ottokraftstoff
3	3	1	Ref. VKM EMVT	EURO 4B	wie 1: elektromechan. variable Ventile	Benzin	Ottokraftstoff
4	4	1	Ref. VKM-Otto-Start/Stopp	EURO 4B	wie 1: Start/Stopp-Hybrid-Konzept	Benzin	Ottokraftstoff
5	5	1	Ref. VKM-Otto-LLReifen	EURO 4B	wie 1: Otto 2000 Leichtlaufreifen	Benzin	Ottokraftstoff
6	6	1	Ref. VKM-Otto-LL-Öl	EURO 4B	wie 1: Otto 2000 Leichtlauföl	Benzin	Ottokraftstoff
7	7	1	VKM-Benzin-DI	EURO 4B	Benzin- Direkteinspritzung	Benzin	Ottokraftstoff
8	7	1	VKM-Benzin-DI	SULEV	Benzin- Direkteinspritzung	Benzin	Ottokraftstoff
9	8	1	VKM-Benzin-HubredLader	EURO 4B	Benzin-red. Hubraum, Aufladung	Benzin	Ottokraftstoff
10	8	1	VKM-Benzin-HubredLader	SULEV	Benzin-red. Hubraum, Aufladung	Benzin	Ottokraftstoff
11	9	1	S-Hybrid-Benzin-DI	EURO 4B	Serieller Hybrid Benzin-DI	Benzin	Ottokraftstoff
12	9	1	S-Hybrid-Benzin-DI	SULEV	Serieller Hybrid Benzin-DI	Benzin	Ottokraftstoff
13	10	1	S-Hybrid-Benzin-Stirling	EURO 4B	Serieller Hybrid Benzin-Stirling	Benzin	Ottokraftstoff
14	10	1	S-Hybrid-Benzin-Stirling	SULEV	Serieller Hybrid Benzin-Stirling	Benzin	Ottokraftstoff
15	11	1	P-Hybrid-Benzin-DI	EURO 4B	Parallel Hybrid Benzin-DI	Benzin	Ottokraftstoff
16	11	1	P-Hybrid-Benzin-DI	SULEV	Parallel Hybrid Benzin-DI	Benzin	Ottokraftstoff
17	12	2	VKM-Diesel	EURO 4D	Diesel-Direkteinspritzung	Diesel	Dieselmotor
18	12	2	VKM-Diesel	EURO 5	Diesel-Direkteinspritzung	Diesel	Dieselmotor
19	13	10	VKM-RME-DI	EURO 4D	RME/Diesel-Direkteinspritzung	RME	Rapsölmethylester
20	13	10	VKM-RME-DI	EURO 5	RME/Diesel-Direkteinspritzung	RME	Rapsölmethylester
21	14	8	VKM-DME-DI	EURO 4D	DME/Diesel- Direkteinspritzung	DME	Dimethylether
22	14	8	VKM-DME-DI	EURO 5	DME/Diesel- Direkteinspritzung	DME	Dimethylether
23	15	2	VKM-Diesel-SDI	EURO 4D	Einliter-Diesel	Diesel	Dieselmotor
24	16	2	S-Hybrid-Diesel	EURO 4D	Serieller Hybrid Diesel-DI	Diesel	Dieselmotor
25	16	2	S-Hybrid-Diesel	EURO 5	Serieller Hybrid Diesel-DI	Diesel	Dieselmotor
26	17	2	S-Hybrid (opt.) Diesel	EURO 4D	Serieller Hybrid (optimiert) Diesel-DI	Diesel	Dieselmotor
27	17	2	S-Hybrid (opt.) Diesel	EURO 5	Serieller Hybrid (optimiert) Diesel-DI	Diesel	Dieselmotor
28	18	2	P-Hybrid-Diesel	EURO 4D	Parallel Hybrid Diesel-DI	Diesel	Dieselmotor
29	18	2	P-Hybrid-Diesel	EURO 5	Parallel Hybrid Diesel-DI	Diesel	Dieselmotor
30	19	2	P-Hybrid (opt.) Diesel	EURO 4D	Parallel Hybrid (optimiert) Diesel-DI	Diesel	Dieselmotor
31	19	2	P-Hybrid(opt.) Diesel	EURO 5	Parallel Hybrid (optimiert) Diesel-DI	Diesel	Dieselmotor
32	20	3	VKM-CNG	EURO 4B	Erdgasverbrennungsmotor-CNG	CNG	komprimiertes Erdgas
33	20	3	VKM-CNG	SULEV	Erdgasverbrennungsmotor-CNG	CNG	komprimiertes Erdgas
34	21	4	VKM-LNG	EURO 4B	Erdgasverbrennungsmotor-LNG	LNG	Flüssigerdgas
35	21	4	VKM-LNG	SULEV	Erdgasverbrennungsmotor-LNG	LNG	Flüssigerdgas
36	22	9	VKM-EtOH	EURO 4B	Ethanolverbrennungsmotor	BioEtOH	Ethanol aus Biomasse
37	22	9	VKM-EtOH	SULEV	Ethanolverbrennungsmotor	BioEtOH	Ethanol aus Biomasse
38	23	7a	VKM-Methanol	EURO 4B	Methanolverbrennungsmotor	MeOH	Methanol aus Erdgas
39	23	7a	VKM-Methanol	SULEV	Methanolverbrennungsmotor	MeOH	Methanol aus Erdgas
40	23	7b	VKM-Methanol	EURO 4B	Methanolverbrennungsmotor	BioMeOH	Methanol aus Biomasse
41	23	7b	VKM-Methanol	SULEV	Methanolverbrennungsmotor	BioMeOH	Methanol aus Biomasse
42	24	7a	S-Hybrid-Methanol-R-BZ	SULEV	Seriell. Hybrid Methanolreformer-BZ	MeOH	Methanol aus Erdgas
43	24	7b	S-Hybrid-Methanol-R-BZ	SULEV	Seriell. Hybrid Methanolreformer-BZ	BioMeOH	Methanol aus Biomasse
44	25	7a	BZ-Methanol-R	SULEV	Brennstoffzelle Methanolreformer	MeOH	Methanol aus Erdgas
45	25	7b	BZ-Methanol-R	SULEV	Brennstoffzelle Methanolreformer	BioMeOH	Methanol aus Biomasse
46	26	7a	DMBZ-Methanol	SULEV	DMBZ-Methanol	MeOH	Methanol aus Erdgas
47	26	7b	DMBZ-Methanol	SULEV	DMBZ-Methanol	BioMeOH	Methanol aus Biomasse
48	27	5a	VKM-CGH2	SULEV+NOx	Wasserstoffmotor-Druck-H <sub>2</sub>	CGH2-ZENT	Druck-H <sub>2</sub> -zentral
49	27	5b	VKM-CGH2	SULEV+NOx	Wasserstoffmotor-Druck-H <sub>2</sub>	CGH2-DE-Z	Druck-H <sub>2</sub> -dezentral
50	28	6a	VKM-LH2	SULEV+NOx	Wasserstoffmotor-Flüssig-H <sub>2</sub>	LH2-FOSSIL	Flüssig-H <sub>2</sub> aus Erdgas
51	28	6b	VKM-LH2	SULEV+NOx	Wasserstoffmotor-Flüssig-H <sub>2</sub>	LH2 -REG	LH <sub>2</sub> Strom Wind Wasser
52	29	5a	BZ-CGH2	ZEV	Brennstoffzelle Druckwasserstoff	CGH2-ZENT	Druck-H <sub>2</sub> -zentral
53	29	5b	BZ-CGH2	ZEV	Brennstoffzelle Druckwasserstoff	CGH2-DE-Z	Druck-H <sub>2</sub> -dezentral
54	30	6a	BZ-LH2	ZEV	Brennstoffzelle Flüssigwasserstoff	LH2-FOSSIL	Flüssig-H <sub>2</sub> aus Erdgas
55	30	6b	BZ-LH2	ZEV	Brennstoffzelle Flüssigwasserstoff	LH2 -REG	LH <sub>2</sub> Strom Wind Wasser
56	31	11	ESF	ZEV	Batterieelektrisches Straßenfahrzeug	Strommix	Netzstrom Deutschland

