

TEXTE

26/2010

# **Ermittlung der Unsicherheiten der mit den Modellen TREMOD und TREMOD-MM berechneten Luftschadstoffemissionen des landgebundenen Verkehrs in Deutschland**



Förderkennzeichen 360 16 023  
UBA-FB 001362

**Ermittlung der Unsicherheiten der mit den  
Modellen TREMOD und TREMOD-MM  
berechneten Luftschadstoffemissionen des  
landgebundenen Verkehrs in Deutschland**

von

**Wolfram Knörr**

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH

**Jürg Heldstab**

**Florian Kasser**

**Mario Keller**

INFRAS, Zürich

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

**UMWELTBUNDESAMT**

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter [http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql\\_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3937](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3937) verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

**Herausgeber:** Umweltbundesamt  
Postfach 14 06  
06813 Dessau-Roßlau  
Tel.: 0340/2103-0  
Telefax: 0340/2103 2285  
E-Mail: [info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

**Redaktion:** Fachgebiet I 3.1 Umwelt und Verkehr  
Andrea Kolodziej, Nadja Richter, Gunnar Gohlisch  
Fachgebiet I 2.6 Emissionssituation  
Michael Kotzulla

Dessau-Roßlau, Mai 2010

# Inhalt

1	Einleitung .....	5
1.1	Ziel des Projekts .....	5
2	Beschreibung der Datenstrukturen und Basisdaten .....	6
2.1	Quellgruppen .....	6
2.2	Aktivitätsraten .....	7
2.3	Emissionsfaktoren .....	7
2.4	Emissionen .....	7
2.5	Klimagase und Luftschadstoffe .....	7
2.6	Eingangsdaten der einzelnen Quellgruppen .....	8
2.6.1	Straßenverkehr .....	8
2.6.2	Schienenverkehr .....	11
2.6.3	Schiffsverkehr .....	12
2.6.4	Bauwirtschaftlicher Verkehr .....	12
3	Begriffe und Methoden der Unsicherheitenrechnung .....	14
3.1.1	Ebenen .....	14
3.1.2	Unsicherheiten .....	14
3.1.3	Standardabweichung und Standardfehler .....	15
3.1.4	Fehlerfortpflanzung .....	18
4	Messdaten Straßenverkehr .....	20
4.1	Aktualisierung der Emissionsfaktoren Straßenverkehr .....	20
4.1.1	Zwei Datenbanken mit Messwerten .....	20
4.1.2	Datenbank für PKW und LNF .....	20
4.1.3	Datenbank für schwere Nutzfahrzeuge .....	21
4.2	Nutzung der Messdaten für die Unsicherheitenrechnung .....	22
4.2.1	PKW .....	22
4.2.2	SNF .....	25
4.2.3	Übrige Fahrzeugkategorien LNF, Busse, MZR .....	26
5	Bestimmung von Unsicherheiten der Aktivitätsraten .....	27
5.1	Vorgehen .....	27
5.2	Unsicherheiten Aktivitätsraten Straßenverkehr .....	28
5.2.1	Inputdaten und Unsicherheiten auf Ebene 5 .....	28
5.2.2	Fehlerfortpflanzung von Ebene 5 auf die Ebenen 2-4 .....	37
5.3	Unsicherheiten Aktivitätsraten übrige Verbraucher .....	39
6	Bestimmung von Unsicherheiten für Emissionsfaktoren und Emissionen .....	42
6.1	Vorgehen .....	42
6.2	Unsicherheiten Emissionsfaktoren und Emissionen Straßenverkehr .....	44
6.2.1	Inputdaten und Unsicherheiten Emissionsfaktoren Ebene 5 .....	44
6.2.2	Unsicherheiten Aktivitätsraten .....	50
6.2.3	Unsicherheiten Emissionen Ebene 5 .....	50
6.2.4	Unsicherheiten Emissionen und Emissionsfaktoren auf den Ebenen 4, 3 und 2 ....	50
6.3	Unsicherheiten Emissionsfaktoren und Emissionen übrige Verbraucher .....	54
6.3.1	Schienenverkehr .....	54
6.3.2	Binnenschifffahrt .....	57

6.3.3	Bauwirtschaftlicher Verkehr.....	57
7	Beurteilung der Resultate, Empfehlungen .....	58
7.1	Vergleich der Unsicherheiten mit anderen Untersuchungen .....	58
7.1.1	Unsicherheiten in Treibhausgasinventaren CH, SF, DK.....	58
7.1.2	Vergleich mit Unsicherheiten der Dissertation Kühlwein .....	59
7.1.3	Modellvergleiche.....	59
7.2	Beurteilung der Resultate für den Straßenverkehr.....	61
7.3	Beurteilung der Resultate für die übrigen Verbraucher.....	64
8	Literaturverzeichnis .....	65
9	Anhang Aktivitätsraten .....	68
10	Anhang Emissionsfaktoren .....	69

# 1 Einleitung

## 1.1 Ziel des Projekts

Deutschland ist als Vertragsstaat der Klimarahmenkonvention und der Genfer Luftreinhalte-Protokolle verpflichtet, Emissionsinventare für Klimagase und Luftschadstoffe zu erstellen. Die Berichtspflichten erfordern als wesentliches Element eines vollständigen Emissionsinventars den Nachweis sowie die Dokumentation der Datenqualität und von Unsicherheiten (absolute oder relative Abweichungen vom berichteten Wert nach den Vorschriften des IPCC (IPCC 1997 und 2000)).

Für die Quellgruppen 1.A.3.b „Straßenverkehr“, 1.A.3.c „Schienenverkehr“, 1.A.3.d Binnenschiffsverkehr“ und 1.A.3.e „Übriger Verkehr“ des Emissionsinventars wurden bisher keine Unsicherheiten ermittelt. Im Rahmen dieses Vorhabens sollen daher die Unsicherheiten der ZSE-Datensätze<sup>1</sup> der Quellgruppen 1.A.3.b bis e für alle Kraftstoffarten und sowohl für Treibhausgase als auch Luftschadstoffe bestimmt werden.

Grundlage der ZSE-Datensätze der Quellgruppen 1.A.3.b bis e sind die von IFEU für das Umweltbundesamt entwickelten Programme TREMOD und TREMOD MM (v.a. Emissionsfaktoren) sowie die Absatzzahlen von Kraftstoffen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, des Bundesamtes für Ausfuhrkontrolle (BAFA) und des Mineralölwirtschaftsverbandes (Aktivitätsraten).

Die für die Berichterstattung relevante Datenbasis in den Programmen TREMOD und TREMOD MM werden derzeit bzw. wurden kürzlich im Rahmen von Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes aktualisiert (IFEU 2009a, b) und standen daher noch nicht vollständig in der endgültigen Fassung zur Verfügung. Für die vorliegende Untersuchung wurden daher als Basis für die Bestimmung der Unsicherheiten vorläufige Ergebnisse der aktuellen Mineralölstatistik und die aktualisierten Fahrleistungen und Fahrzeugbestände für das Bezugsjahr 2007 sowie die aktuelle Emissionsfaktorendatenbasis des Straßenverkehrs für das neue Handbuch Emissionsfaktoren (INFRAS 2009a) verwendet.

Damit ist gewährleistet, dass die Ableitung der Unsicherheiten in dieser Studie einerseits die aktuellsten Basisdaten verwendet und zum anderen die Ergebnisse rechtzeitig zur nächsten Runde der Berichterstattung Mitte 2009 zur Verfügung steht.

---

<sup>1</sup> ZSE Zentrales System Emissionen

## 2 Beschreibung der Datenstrukturen und Basisdaten

### 2.1 Quellgruppen

In dieser Untersuchung werden die Quellgruppen 1.A.3.b bis 1.A.3.e betrachtet. Einbezogen werden dabei die flüssigen fossilen Brennstoffe Ottokraftstoff und Dieselkraftstoff. Damit entfallen bestimmte Kategorien in den betrachteten Quellgruppen, z.B. alle Biokraftstoffe, Gase und feste Brennstoffe. Die internationale Seeschifffahrt wird nicht betrachtet. Definitionsgemäß entfallen damit auch die Gasturbinen beim Rohrleitungstransport.

**Tab. 1 Übersicht über die betrachteten Quellgruppen**

Bezeich.*	Zusatz	Strukturelement	Material
<b>1.A.3.b</b>		<b>Straßenverkehr**</b>	
	I	PKW	Ottokraftstoff („Benzin“)
	II	LNF	Diesekraftstoff („Diesel“)
	III	SNF	<i>Nicht betrachtet:</i>
	IV	Zweiräder (Abk.:KKR, KR oder MZR)	<i>Ottokraftstoff (Bio)</i>
	V	Verdunstung	<i>Diesekraftstoff (Bio)</i> <i>CNG, LPG, Petroleum</i>
<b>1.A.3.c</b>		<b>Schienenverkehr</b>	
	I	Kraftstoff	Diesekraftstoff
	II	<i>Kohle</i>	<i>Nicht betrachtet</i>
<b>1.A.3.d</b>		<b>Schifffahrt</b>	
	I	<i>Internationale Seeschifffahrt</i>	<i>Nicht betrachtet</i>
	II	Nationale Binnen- und Küstenschifffahrt	Diesekraftstoff
<b>1.A.3.e</b>		<b>Sonstige Verbraucher</b>	
	I	Gasturbinen in Erdgasverdichterstationen	<i>Nicht betrachtet</i>
	II	Bauwirtschaftlicher Verkehr	Ottokraftstoff Diesekraftstoff
*Die Bezeichnung entspricht dem NFR Code (Nomenclature for Reporting) wie sie inzwischen im Reporting für Klima- und die Genfer Konvention üblich ist.			
** weiter unterteilt nach Technik (mit/ohne Minderungstechnik) und Straßenkategorie (Autobahn, außerorts, innerorts)			

Die Quellgruppen 1.A.3.c bis 1.A.3.e werden somit jeweils durch ein Strukturelement repräsentiert. Beim Straßenverkehr gibt es dagegen eine mehrstufige Untergliederung. Die Strukturelemente auf unterster Ebene sind differenziert nach Fahrzeugkategorie, Minderungstechnik und Straßenkategorie. Damit wird der wichtigen Bedeutung des Straßenverkehrs als Verursacher von Klimagasen Rechnung getragen.

## 2.2 Aktivitätsraten

Die Aktivitätsraten der Quellgruppen 1.A.3.b bis e entsprechen im Treibhausgasinventar den in den Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland dokumentierten Endenergieverbräuchen der Sektoren „Schienenverkehr“ (EBZ 61), „Straßenverkehr“ (62), „Luftverkehr“ (63) und „Küsten- und Binnenschifffahrt“ (64) bzw. „Verkehr insgesamt“ (65) sowie (nur relevant für 1.A.3.e) „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen u. übrige Verbraucher“ (67). Sie werden üblicherweise in Terajoule (TJ) angegeben. Vorläufige Werte für die Emissionsberichterstattung werden den Mineralölstatistiken des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) und den Mineralölzahlen des Mineralölwirtschaftsverbandes (MWV) entnommen.

## 2.3 Emissionsfaktoren

Die im Treibhausgasinventar verwendeten Emissionsfaktoren entsprechen in ihrer Struktur den Aktivitätsraten der Quellgruppen 1.A.3.b bis 1.A.3.e. Sie tragen die Einheit [kg/TJ]. Im Falle des Straßenverkehrs kommen bei der Berechnung der Unsicherheiten Emissionsfaktoren der Einheit [g/km] zum Einsatz.

Auf den Stufen 1.A.3.b bis 1.A.3.e sind Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren bereits sehr stark aggregiert. Emissionsmodellierungen beginnen üblicherweise auf disaggregierteren Ebenen (einzelne Straßen, einzelne Fahrzeugkategorien/Abgaskonzepte) und werden anschließend schrittweise addiert. Die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren müssen aus Messdaten auf der tiefsten Ebene (je Fahrzeug) bestimmt werden. Auf jeder höheren Stufe lassen sich dann wieder mittlere Emissionsfaktoren berechnen, indem die Emissionen durch die Aktivitätsraten dividiert werden. Auf den höheren Ebenen lassen sich die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren mit Regeln der Fehlerrechnung bestimmen.

Im ZSE sind Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren nicht auf allen Ebenen implementiert, sondern ab einer mittleren Detailebene (siehe Tab. 3). Die Unsicherheitenrechnung in der vorliegenden Studie beginnt auf der Messebene und wird zunächst auf die Ebene der ZSE-Daten aggregiert. Anschließend findet eine weitere Aggregation auf die Stufe 1.A.3.b statt.

## 2.4 Emissionen

Die Emissionen im Treibhausgasinventar ergeben sich als Produkt aus Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren. Sie tragen die Einheit Tonnen t (oder Gg: 1 Gg = 1'000 t) und sind ebenfalls in der Systematik des NFR Code dargestellt.

## 2.5 Klimagase und Luftschadstoffe

Vereinbarungsgemäß werden bei der Bestimmung der Unsicherheiten zunächst die Klimagase (Kohlendioxid, Methan, Lachgas) sowie die Stickstoffoxide und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe einbezogen.

## 2.6 Eingangsdaten der einzelnen Quellgruppen

### 2.6.1 Straßenverkehr

#### a) TREMOD als Datenquelle für das ZSE

Die Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren für das ZSE werden für den Straßenverkehr aus TREMOD abgeleitet. Eine in TREMOD vorhandene Schnittstelle überführt die Ergebnisse in die ZSE-Struktur und ermöglicht damit einen direkten Import der Werte in das ZSE.

Bei der Aufbereitung der TREMOD-Daten für das ZSE müssen die sehr differenzierten TREMOD-Kategorien zusammengefasst werden. Bei den Emissionsfaktoren werden dazu die TREMOD-Emissionsergebnisse und der Energieverbrauch, differenziert nach Kraftstoffarten (ZSE: Material), zu ZSE-Kategorien (Strukturelemente) aggregiert. Die Emissionsfaktoren (in kg/TJ) ergeben sich durch Division der Emissionen je Strukturelement durch den Kraftstoffverbrauch je Strukturelement. Es handelt sich demnach um eine reine Bottom-up-Berechnung.

Bei der Ableitung der Aktivitätsraten müssen Bottom-up- und Top-down-Berechnungen kombiniert werden. Denn grundsätzlich ist der jährliche Energieverbrauch je Kraftstoffart für den Straßenverkehr durch die Energiebilanz vorgegeben. Die Aufgabe ist es daher, den vorgegebenen Energieverbrauch auf die Strukturelemente aufzuteilen. Dabei sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Mit TREMOD werden Energieverbrauch und Emissionen für den Straßenverkehr im Inland berechnet (Basis: Fahrleistungen von Inländern und Ausländern auf dem inländischen Straßennetz).
- Die Energiebilanz weist den inländischen Kraftstoffabsatz aus.

Die Differenz zwischen den mit TREMOD bottom-up berechneten Verbräuchen und den Absatzzahlen nach Energiebilanz wird durch Anpassungsfaktoren ausgeglichen (siehe Kapitel 5.1 und 5.2). Die Korrekturfaktoren berücksichtigen durch folgende Einflussfaktoren verursachte Differenzen:

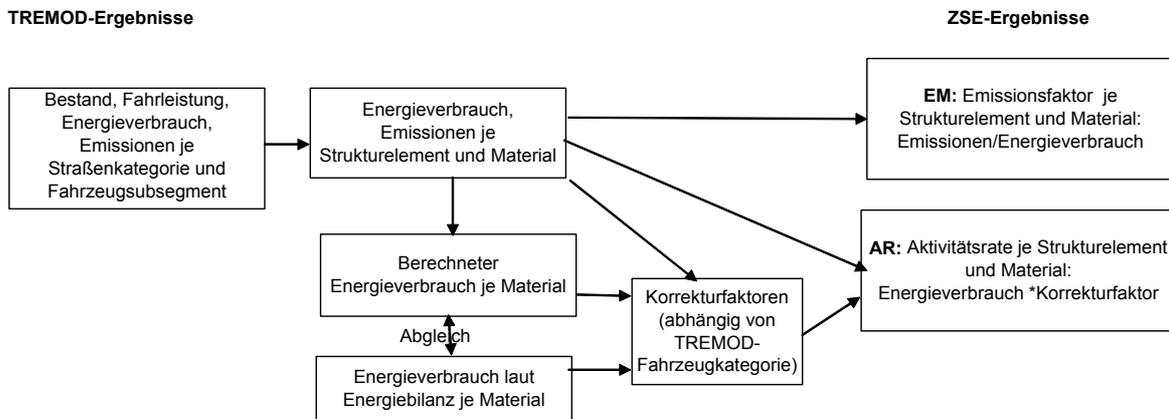
#### Unsicherheiten bei der Erfassung der Kraftstoffabsätze:

- Zeitliche Differenzen zwischen Betankung und Verbrauch (Jahreswechsel)
- Räumliche Differenzen: Region der Fahrleistung verschieden von Region der Betankung (hier: Deutschland)
- Zuordnungsdifferenzen der Energiebilanz (z.B. Kraftstoffmengen, die in der Energiebilanz dem Straßenverkehr zugeordnet wurden, aber nicht im Straßenverkehr verbraucht wurden).

#### Unsicherheiten des Emissionsmodells

- Ermittlung der Gesamtfahrleistung je Fahrzeugkategorie und Aufteilung auf die Straßenkategorien,
- Anteile verschiedener Verkehrssituationen/Längsneigungsklassen an der Fahrleistung
- Bestimmung der Fahrleistungsanteile der einzelnen Fahrzeugschichten (Antrieb, Größenklasse, Alter, Emissionsstandard)
- Spezifischer Energieverbrauch der Fahrzeugschichten je Verkehrssituation.

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über den prinzipiellen Ablauf der Übergabe von TREMOD in das ZSE:



**Abb. 1 Übergabe der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs von TREMOD in das ZSE**

## b) Fahrleistungen

Die gesamte Inlandsfahrleistung in Deutschland wird nicht kontinuierlich ermittelt. Regelmäßige Verkehrszählungen finden statt auf Bundesautobahnen und überörtlichen Bundesstraßen (BAST 2009) und alle fünf Jahre auch auf Landesstraßen und in manchen Bundesländern auf Kreisstraßen (BAST 2007). Damit werden das gesamte innerörtliche Straßennetz und die Gemeindestraßen nicht durch regelmäßige Zählungen erfasst.

Untersuchungen zur Bestimmung der Inlandsfahrleistungen liegen nur für die Jahre 1993 und 2002 vor (Heusch Boesefeldt 1996, IVT 1994, IVT 2004). 1993 wurden die Inlandsfahrleistungen nicht nur für die verschiedenen Fahrzeugkategorien sondern auch in der Differenzierung nach Straßenkategorien und Streckenmerkmalen (Verkehrssituationen) abgeleitet. Die Untersuchung für 2002 beschränkte sich auf die Ermittlung der Inlandsfahrleistung nach Fahrzeugkategorien.

Das DIW ermittelt seit vielen Jahren die Inländerfahrleistungen auf Basis einer Modellrechnung, bei der Fahrzeugbestände, durchschnittliche Jahresfahrleistung und durchschnittliche Kraftstoffverbräuche aufgrund verschiedener Quellen ermittelt und miteinander abgestimmt werden (DIW 2005).

Da in TREMOD die Fahrleistungen in hoher Differenzierung (Fahrzeugkategorien, Straßenkategorien, Verkehrssituationen, Fahrzeugschichten) benötigt werden, mussten die vorhandenen Informationen verwendet und durch plausible Interpolationen und Ergänzungen für eine differenzierte Zeitreihe aufbereitet werden. Das Verfahren ist im Detail in (IFEU 2005) beschrieben.

Ein wesentliches Merkmal des Verfahrens ist es, dass i.d.R. die Fahrleistungen für Autobahnen und die meisten Außerortsstraßen sowie die Gesamtfahrleistung vorgegeben sind und die Innerortsfahrleistungen als Differenz ermittelt werden. Die Plausibilitätskontrolle erfolgt zum einen über die Anteile der verschiedenen Fahrzeugkategorien im Innerortsverkehr, die sich aufgrund der Ergebnisse von Einzelzählungen in bestimmten Bandbreiten bewegen sollten, zum anderen über die relative Stabilität der Fahrleistungsanteile über die Zeitreihe (d.h. Vermeidung großer Sprünge von einem Jahr auf das nächste). Auf-

grund von Unplausibilitäten wurde z.B. in TREMOD die Gesamtfahrleistung der Last- und Sattelzüge gegenüber den Eckdaten der Inlandsfahrleistung im Jahr 2002 angehoben.

Für die einzelnen Fahrzeugkategorien wurde somit folgendes Vorgehen für die Ableitung der **Gesamtfahrleistung** gewählt:

**PKW.** DIW-Modellrechnung mit Korrekturfaktor auf Inlandsfahrleistungen

**Krafträder, Mopeds:** DIW Modellrechnung (Inländerfahrleistung = Inlandsfahrleistung)

**Busse:** Inlandsfahrleistung nach (Heusch Boesefeldt 1996, IVT 2004), Zeitreihe, angepasst an DIW

**Leichte Nutzfahrzeuge:** Inlandsfahrleistung nach (Heusch Boesefeldt 1996a, IVT 2004a), Zeitreihe angepasst an Bestandsentwicklung und Ergebnisse der Straßenverkehrszählungen auf Autobahnen und Außerortsstraßen

**Schwere Nutzfahrzeuge:** Ergebnisse der Straßenverkehrszählungen (Autobahn, Außerorts), Innerortsverkehr aus Plausibilitätschecks, Inlandsfahrleistung TREMOD daher abweichend von DIW und IVT

Die Fahrleistungen werden in TREMOD weiter differenziert in die **Fahrleistungsanteile nach Verkehrssituationen**. Einzige Quelle hierfür ist die Fahrleistungsuntersuchung 1993 (Heusch Boesefeldt 1996). Die dort ermittelten Anteile werden unverändert für alle Bezugsjahre in TREMOD verwendet.

Eine weitere Fahrleistungsdifferenzierung ist für die **Fahrleistungsanteile nach Fahrzeugschichten** vorzunehmen, da diese Fahrzeugeigenschaften (Antrieb, Größenklasse, Alter, Emissionsstandard) einen großen Einfluss auf die mittlere Jahresfahrleistung dieser Fahrzeugschicht haben. Auch für diese Gewichtung werden die Ergebnisse der Fahrleistungsuntersuchung 1993 (Heusch Boesefeldt 1996) und Fahrleistungserhebung 1993 und 2002 (IVT 1994 und IVT 2004) verwendet.

Bei der Fahrleistungsdifferenzierung nach Fahrzeugschichten ist die **Bestandsstatistik** (KBA) eine weitere wesentliche Quelle. Hinsichtlich der Unsicherheiten sind folgende Punkte zu beachten:

- Die Bestandstatistik entspricht nicht immer den Fahrzeugschichten aus den Emissionsmessprogrammen. In diesen Fällen werden Annahmen getroffen, welche Fahrzeugmerkmale im Bestand welchen Fahrzeugschichten entsprechen.
- Es werden die Fahrzeugbestände in Deutschland zugrunde gelegt. Diese bilden jedoch nicht die Fahrzeugflotte auf deutschen Straßen exakt ab. Dies ist insbesondere bei den großen Lkw im Fernverkehr mit ihrem hohen Ausländeranteil relevant.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden diese Aspekte nicht berücksichtigt, da der mögliche Fehler als relativ gering geschätzt wird und schwer quantifizierbar ist.

### **Unsicherheiten der Fahrleistungen**

Aufgrund der Datenlage ist mit hohen Unsicherheiten bzgl. der Fahrleistungen auf den unteren Ebenen mit hoher Differenzierung (Fahrzeugschicht, Verkehrssituation) zu rechnen. Die relative Unsicherheit nimmt mit der Zusammenfassung zu übergeordneten Kategorien (Fahrzeugkategorie, Straßenkategorie und darüber Straßenverkehr insgesamt) deutlich ab. Da die Gesamtfahrleistung durch Eckdaten festgelegt ist, besteht eine Korrelation zwischen den Elementen auf den Detailebenen, was die Unsicherheit auf den aggregierten Ebenen weiter verringert.

### c) Energieverbrauchs- und Emissionsfaktoren

Basis für die spezifischen Energieverbräuche und Emissionsfaktoren in TREMOD ist das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) (INFRAS 2004b) bzw. (INFRAS 2009b). Die im HBEFA enthaltenen Emissionskennwerte beruhen auf einer breiten Datenbasis europäischer Messinstitute und auf europäischer Ebene abgestimmten und entwickelten Methoden zur Emissionsmodellierung. Dies hat den Vorteil, dass die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren europaweit ähnliche Größenordnungen haben sollten.

Eine Besonderheit betrifft den **spezifischen Energieverbrauch der Pkw** bei dem eine länderspezifische Korrektur stattfindet. Die seit 1995 europaweit durchgeführte Erfassung der Kraftstoffverbräuche der neuzugelassenen Fahrzeuge im Normzyklus (NEFZ) erlaubt eine länderspezifische Anpassung des spezifischen Energieverbrauchs der drei Pkw-Größenklassen (jeweils Otto und Diesel) im Modell. Diese Anpassung verbessert die Datenqualität bei den Verbrauchsdaten, da die modellierte Aufteilung der Pkw-Flotte in drei Größenklassen Ungenauigkeiten beinhaltet. Denn die Anzahl der bei den Emissionsmessungen berücksichtigten Fahrzeuge bildet nicht das gesamte Spektrum der realen Fahrzeugflotte ab. In INFRAS 2004b konnte gezeigt werden, dass der mittlere Flottenverbrauch einer Größenklasse in den einzelnen Ländern sehr unterschiedlich ausfallen kann.

Die Emissionsfaktoren im ZSE werden aus Quotient der Emissionen je Strukturelement und dem zugehörigen Energieverbrauch berechnet. Daher gehen die Unsicherheiten der Verbrauchswerte auch direkt in die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren ein.

#### 2.6.2 Schienenverkehr

Die Kennzahlen des Schienenverkehrs werden vom Umweltbundesamt in das ZSE eingetragen. Grundlagen sind

- Der Dieselmotorkraftstoffabsatz gemäß der Energiebilanz (AG Energiebilanzen) und des MWV (MWV 2009a)
- Mittlere Emissionsfaktoren (in g/kg) je Bezugsjahr aus TREMOD.

Die Informationen zum Dieselmotorkraftstoffabsatz des Schienenverkehrs setzen sich zusammen aus dem Verbrauchsangaben der Deutschen Bahn AG (2007 ca. 75 % des gesamten Verbrauchs des Schienenverkehrs) und Abschätzungen für die übrigen Bahnen. Die DB AG liefert darüber hinaus Informationen über die Aufteilung des Dieselmotorkraftstoffverbrauchs auf die Verkehrsarten Personennahverkehr, Personenfernverkehr und Güterverkehr. Der Verbrauch für Rangieren wird extra ausgewiesen (DB AG 2009).

Diese Differenzierung hat keine Auswirkung auf die im ZSE dargestellten Aktivitätsraten, da dort nur der Gesamtverbrauch des Eisenbahnverkehrs dokumentiert wird.

Die Emissionsfaktoren des Schienenverkehrs beruhen auf den Emissionsfaktoren der einzelnen Motoren, gemessen im ISO-F Zyklus. Die Datenbasis wurde in den Jahren 2000-2003 entscheidend verbessert: Im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden Emissionen der häufigsten aktuellen Bahnmotoren gemessen (WTZ 2002). Dabei wurden auch Messpunkte, die nicht Bestandteil des ISO-F-Zyklus sind, jedoch in der Realität häufig vorkommen, berücksichtigt. Mit diesen Daten wurden die Unterschiede zwischen den E-

missionen im ISO-F-Zyklus und verschiedenen Zyklen aus dem realen Fahrbetrieb ermittelt.

Für die Emissionsberechnung in TREMOD konnten zwar mangels repräsentativer Daten und wegen der wenigen Motoren, für die ein erweiterter Emissionsfaktorendatensatz für verschiedene Messpunkte vorliegt, kein reales Fahrverhalten zugrunde gelegt werden. Mit Hilfe der Ergebnisse der Studie IFEU 2003a ist es jedoch möglich, die Unterschiede zwischen ISO-F und realem Fahrbetrieb abzuschätzen und damit Unsicherheiten zu ermitteln.

Die Ableitung mittlerer Emissionsfaktoren für den Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr erfolgt durch Gewichtung der Emissionsfaktoren je Motor mit den Leistungstonnenkilometern, die die Triebfahrzeuge mit den jeweiligen Motoren in einem Jahr erbracht haben. Im ZSE werden die Emissionsfaktoren für den gesamten Eisenbahnverkehr aus der Summe der Emissionen einer Komponente dividiert durch die Summe des Energieverbrauchs berechnet.

### **2.6.3 Schiffsverkehr**

Die Kennzahlen des Binnenschiffsverkehrs werden vom Umweltbundesamt im ZSE eingetragen. Grundlagen sind

- Der Dieselkraftstoffabsatz gemäß der BAFA-Statistik (BAFA)
- Mittlere Emissionsfaktoren (in g/kg) je Bezugsjahr aus TREMOD.

Der Dieselkraftstoffabsatz gemäß der Energiebilanz korreliert nicht mit der Verkehrsleistung in Deutschland. Über die Jahre ist er außerdem großen Schwankungen unterworfen. Zum einen ist davon auszugehen, dass größere Mengen im Ausland getankt werden. Laut Auskunft des MWV ist ein weiterer Grund, dass in der Binnenschifffahrt so genanntes Gasöl verbraucht wird, dass in der Statistik seit 2007 dem Heizöl zugeordnet wird (MWV 2008). Man kann daher von einer Unterschätzung des Kraftstoffverbrauchs in der Binnenschifffahrt ausgehen (siehe auch Kap. 5.3).

### **2.6.4 Bauwirtschaftlicher Verkehr**

Zum Kraftstoffverbrauch der Bauwirtschaft liegen neben den mit TREMOD-MM ermittelten Werten auch Angaben im ZSE und vom MWV vor. Das ZSE erfasst in der Kategorie 1.A.3.e den bauwirtschaftlichen Verkehr. Die Aktivitätsraten dieser Kategorie sind in der Energiebilanz nicht extra ausgewiesen, sie sind im Sektor „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen u. übrige Verbraucher“ (Energiebilanzzeile 67) enthalten.

Extra ausgewiesen werden die Werte für den Bauwirtschaftssektor in der MWV-Statistik (MWV 2009a). Der MWV ermittelt den Dieselkraftstoffverbrauch der Bauwirtschaft aufgrund der Kostenstrukturstatistik und des Produktionsindex für den Tiefbau (einschließlich Straßenbau und Eisenbahnbau) des Statistischen Bundesamtes (MWV 2009b). Diese Werte gehen in die Energiebilanz ein.

TREMOD-MM (IFEU 2003c, 2009) berechnet den Energieverbrauch des Sektors Bauwirtschaft und Industrie vergleichsweise detailliert nach einem Bottom-up-Verfahren aus Maschinenbeständen, differenziert nach emissionsrelevanten Schichten, sowie deren mittlere Nennleistungen, Betriebsstunden, Lastfaktoren und Emissionsfaktoren nach folgender Formel:

$$E_y = \sum E_{A,x}$$

$$E_{A,x} = \text{Anz} \times P \times Z \times \text{LF} \times \text{EF}$$

$E_y$	Verbrauch bzw. Emissionen des gesamten Sektors im Bezugsjahr y
$E_{A,x,y}$	Verbrauch bzw. Emissionen (einer Schicht, z.B. Traktoren 37-75 kW; Baujahr x im Bezugsjahr y)
Anz	Anzahl/Bestand von Geräten/Maschinen/Fahrzeugen
P	Mittlere Nennleistung (für diese Schicht)
Z	Zahl der spezifischen Betriebsstunden
LF	typischer mittlerer Lastfaktor (<1)
EF	Verbrauchs- bzw. Emissionsfaktor (g/kWh)

Ein detaillierter Vergleich der unterschiedlichen Methoden von IFEU und MWV war bisher nicht möglich, da die notwendigen Informationen vom MWV aus Zeitgründen nicht zur Verfügung gestellt werden konnten.

Das Umweltbundesamt ermittelt den Dieselkraftstoffverbrauch pauschal aus der Energiebilanzzeile 67 nach folgendem Verfahren: Der Verbrauch des Militärs wird abgezogen, vom Rest gehen 42 % in den Sektor Bauwirtschaft (ZSE Sektor 1.A.3.e ii). Dieses Verfahren wurde trotz der großen Unsicherheiten bisher beibehalten, da die AG Energiebilanzen noch keine detaillierten Angaben zur Aufteilung des Energieverbrauchs in der Energiebilanz liefern konnte.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Vorgehensweise weichen die Ergebnisse der drei Quellen sehr stark voneinander ab (siehe Tab. 2).

**Tab. 2 Aktivitätsraten der Bauwirtschaft in unterschiedlichen Quellen in Deutschland 2007**

Quelle	Ottokraftstoff (in TJ)	Dieselmkraftstoff (in TJ)
MWV 2009a*	-	19'122
TREMOM MM (IFEU 2009a)**	4'342	55'741
ZSE 2008***	3'623	33'839

\* Stationäre und ortsbewegliche Motoren sowie nichtmotorische Zwecke  
 \*\* Bauwirtschaft und Industrie  
 \*\*\* Bauwirtschaftlicher Verkehr

Die Bandbreite der verschiedenen Ergebnisse ist demnach beim Dieselmkraftstoff mit dem Faktor drei sehr hoch. Damit besteht derzeit eine hohe Unsicherheit bezüglich des Kraftstoffverbrauchs im Bausektor.

Die Emissionsfaktoren im ZSE werden dabei auf Basis von TREMOD-MM abgeleitet, in dem, wie beim Schienenverkehr, die Gesamtemissionen des Bauwirtschaftssektors durch den Gesamtverbrauch dividiert werden.

### 3 Begriffe und Methoden der Unsicherheitenrechnung

#### 3.1.1 Ebenen

Für die Bestimmung der Unsicherheiten werden folgenden Ebenen unterschieden:

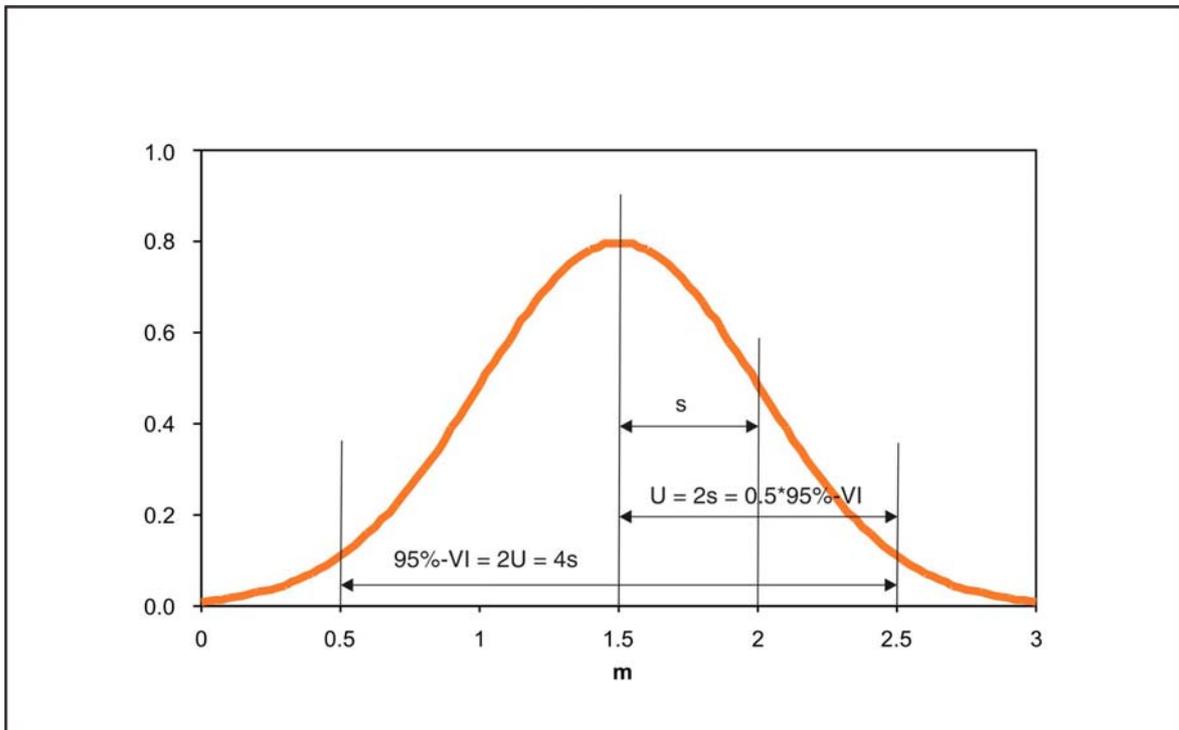
**Tab. 3 Ebenen der Unsicherheitenrechnung**

Nr.	Ebene	Spezifikation	Datenquelle
1	Nation/Bund	Absatz (A), Emissionsfaktoren (EF) und Emissionen (Em) für Otto und Diesel	A: Nat. Energiebilanz, EF, Em: ZSE
2	Sektoren	Je Sektor für Otto und Diesel - Straßenverkehr - Schienenverkehr - Schifffahrt - Gewerbe, Handel, Dienstleistungen u. übrige Verbraucher - Haushalte - Luftverkehr	Nat. Energiebilanz Verbrauch, EF, Emissionen aus TREMOD/TREMOD MM, Anpassungsfaktoren Absatz aus nat. Energiebilanz
3	Fahrzeugkategorien (nur für Straßenverkehr relevant)	- PKW: Otto/Diesel - SNF: Diesel - LNF: Otto/Diesel - Busse: Diesel - MZR: Otto	EF und Verbrauchsfaktoren aus TREMOD Fahrleistungen: - Total aus DIW - AB/AO: Verkehrszählungen
4	Minderungstechnik (nur für Straßenverkehr relevant)	Aufteilung nach Straßenkategorie / Technik - ohne Minderungstechnik - mit Minderungstechnik	EF und Verbrauchsfaktoren aus TREMOD Fahrleistungen: - Total aus DIW - AB/AO: Verkehrszählungen
5	Straßenkategorie (nur für Straßenverkehr relevant)	Aufteilung nach Straßenkategorie / Technik - Autobahn AB - außerorts AO - innerorts IO	EF und Verbrauchsfaktoren aus TREMOD Fahrleistungen aus DIW (nat. totale) und Verkehrszählungen (AB/AO)
6	Weitere Kategorien	Verkehrssituationen, Fahrzyklen	EF und Verbrauchsfaktoren aus TREMOD resp. Handbuch Emissionsfaktoren

#### 3.1.2 Unsicherheiten

Gemäß den IPCC-Guidelines (IPCC 1997) und der UNFCCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in Nat. Greenhouse Gas Inventories (IPCC 2000) werden Unsicherheiten immer auf das 95 %-Vertrauensintervall (U95 %) bezogen. Im Fall von Normalverteilungen ist die Breite dieses Intervalls ca. 2 (genauer 1.96) Standardabweichungen (s). Unsicherheiten (U) werden in Originaleinheiten oder relativ ( $U_{rel} = U/m$ ), d.h. in Prozent des Mittelwerts (m) angegeben, und zwar als Hälfte des 95 %-VI.

$$\text{absolut } U_{abs} = \frac{95\%-\text{Vertrauensintervall}}{2} \approx 2 \cdot s; \quad \text{relativ } U_{rel} = \frac{U_{abs}}{2m} \cdot 100\%$$



**Abb. 2** Standardabweichung  $s$ , Unsicherheit  $U$  (95%) und 95%-Vertrauensintervall bei einer Normalverteilung.

### 3.1.3 Standardabweichung und Standardfehler

In der vorliegenden Studie werden Messdaten und deren Streuungen für die Bestimmung der Unsicherheiten der Strassenfahrzeuge benutzt. Die folgenden Überlegungen dienen zur Erläuterung, weshalb die Standardfehler der berechneten Mittelwerte (Verbrauch, Emissionsfaktoren) als Mass der Unsicherheiten dienen und nicht die Standardabweichungen.

#### Standardabweichung

Die Standardabweichung einer Fahrzeug-Population bildet eine tatsächlich vorhandene Streuung ab, die auch bei höchster Messgenauigkeit und unendlich vielen Einzelmessungen vorhanden ist (z. B. bei Emissionsfaktoren, Größenverteilung, Monatseinkommen).

Die wahre Standardabweichung der Population ( $\sigma_x$ ) wird empirisch aus einer Stichprobe mit Messwerten  $x_i$  mit Stichprobenumfang  $n$  und arithmetischem Mittel  $m$  der Stichprobe mit folgender Formel geschätzt

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}$$

Sie gibt an, ob die Einzelwerte nahe beieinander liegen oder ob eine starke Streuung der Daten vorliegt. Im Fall von Motorfahrzeugen zeigen die Messkampagnen, dass es von Fahrzeug zu Fahrzeug grosse Unterschiede bei gleichen Fahrzyklen gibt, dass also die Standardabweichungen bei Verbrauchs- und Emissionsfaktoren gross sind. In den meisten Fällen kann man davon ausgehen, dass die Messunsicherheiten symmetrisch verteilt sind und bezüglich ihrer Häufigkeit ein Maximum besitzen. In diesen Fällen nimmt man an, dass die Häufigkeitsverteilung durch eine Normalverteilung (Gauß'sche Glockenkurve) hinreichend gut beschrieben werden können. Damit sind gleichzeitig auch Rechenregeln über die Fehlerfortpflanzung vorgegeben (siehe Kap. 3.1.4).

Es gibt allerdings auch Fälle mit sehr großen und asymmetrisch verteilten Messunsicherheiten. Wo solche vorkommen, überdeckt das Fehlerintervall der Normalverteilung auch negative Werte, sobald die Unsicherheit größer als der Mittelwert ist, was bei Verbrauchszahlen und Emissionsfaktoren natürlich nicht realistisch ist. In der vorliegenden Untersuchung wird für asymmetrische Fälle eine logarithmische Normalverteilung („Lognormalverteilung“) unterstellt<sup>2</sup>. Operativ arbeitet man mit den logarithmierten Messwerten, die ihrerseits wieder normalverteilt sind. An die Stelle von Mittelwert und Standardabweichung treten

$$m_{\log} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \log x_i \quad \text{und} \quad s_{\log x} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\log x_i - m_{\log})^2}.$$

Die Parameter

$$m^* = e^{m_{\log}} \quad \text{und} \quad s^* = e^{s_{\log x}}$$

entsprechen dem Median und der „multiplikativen Standardabweichung“. Für die Fehlerintervalle gelten folgende Entsprechungen zwischen Normal- und Lognormalverteilung

#### Normalverteilung

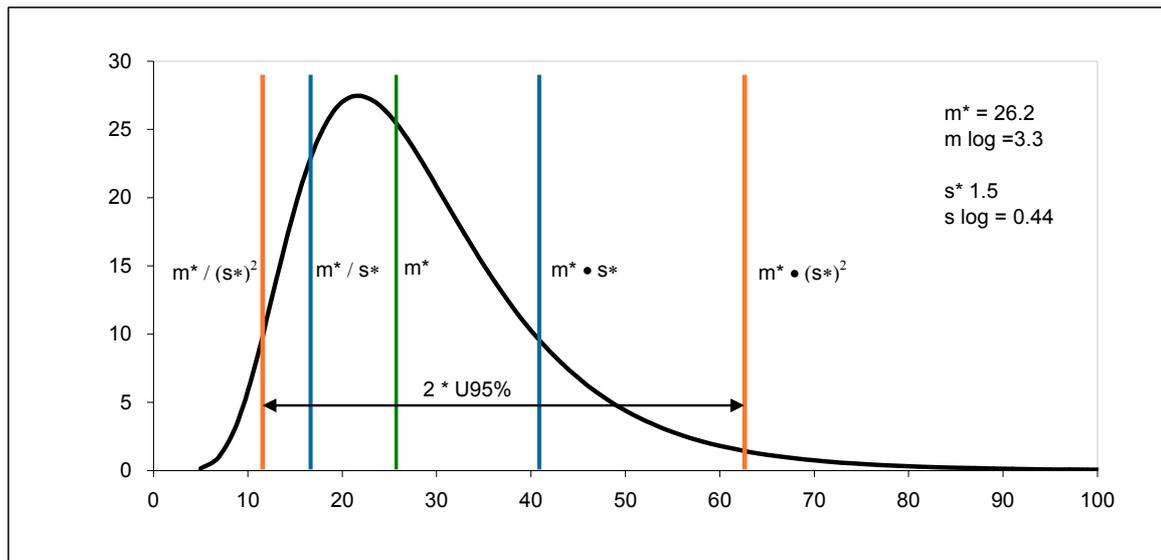
#### Lognormalverteilung

$$(m - s, m + s) \quad \Rightarrow \quad (m^* / s^*, m^* \cdot s^*) \quad 68\% \text{- Intervall}$$

$$(m - 2s, m + 2s) = (m - U95\%, m + U95\%) \quad \Rightarrow \quad (m^* / (s^*)^2, m^* \cdot (s^*)^2) \quad 95\% \text{- Intervall}$$

Die Symmetrie der Fehlerintervalle in der Normalverteilung fällt bei der Lognormalverteilung weg. Weil die Verteilung links-steil verläuft, die unteren Werte der Fehlerintervalle können keine negativen Werte annehmen und geben damit realistischere Unsicherheiten.

<sup>2</sup> siehe z.B. [http://de.wikipedia.org/wiki/Logarithmische\\_Normalverteilung](http://de.wikipedia.org/wiki/Logarithmische_Normalverteilung)



**Abb. 3 Beispiel einer Lognormalverteilung**

Bei den in Kap. 6 folgenden Resultaten wird jeweils eine relative Unsicherheit U95 % angegeben. Im Fall von Normalverteilungen liegt das Fehlerintervall symmetrisch um den Mittelwert und die Angabe von U95 % ist vollständig und eindeutig. Im Fall von Lognormalverteilungen mit asymmetrischem Fehlerintervall ist die vollständige Information erst mit Angabe der unteren und der oberen Unsicherheit gegeben. Der Einfachheit halber wird dennoch bei den Ergebnissen nur eine Zahl zur Unsicherheit angegeben, und zwar die Hälfte des 95 %-Vertrauensintervalls:

$$U95\% = 0.5 \cdot \left( m^* \cdot (s^*)^2 - m^* / (s^*)^2 \right)$$

Die Inputzahlen fürs ZSE sind aber vollständig im oben genannten Sinn, indem je Strukturelement die obere und die untere Unsicherheit angegeben werden.

### Standardfehler

Die Streuung zwischen den Fahrzeugen, die eben durch die Standardabweichung charakterisiert wird, gibt Auskunft über die unterschiedlichen Verbrauchs- und Emissionseigenschaften der Fahrzeuge. Das entspricht aber noch nicht der gesuchten Unsicherheit des Verbrauchs oder der Emissionen. Dies leistet erst der Standardfehler.

Der Standardfehler ist demgegenüber ein Streumaß für eine Stichprobenverteilung. Der Standardfehler des Mittelwertes ist definiert als Wurzel aus der Varianz der Verteilung der Stichproben-Mittelwerte von gleichgroßen Stichproben aus einer gegebenen Grundgesamtheit. Der Standardfehler wird mit folgender Formel geschätzt:

$$s_m = \frac{s_x}{\sqrt{n}}$$

Der Standardfehler liefert eine Aussage über die Güte des berechneten Mittelwerts. Je mehr Einzelwerte es gibt, desto robuster ist der Mittelwert und desto kleiner der Standardfehler. Er findet zum Beispiel Anwendung bei der Messung von Naturkonstanten (z.B. Lichtgeschwindigkeit, Protonenmasse) oder auch, wie im vorliegenden Fall, wenn es um den Treibstoffverbrauch oder die NO<sub>x</sub>-Emissionen im Jahr 2007 in Deutschland geht.

Wenn hier bei mehreren Messungen unterschiedliche Ergebnisse ermittelt werden, variiert nicht die Naturkonstante oder der Treibstoffverbrauch, sondern die Abweichungen werden durch Messfehler verursacht. Misst man häufiger (theoretisch könnte jedes Fahrzeug seinen Verbrauch oder seine Emissionen messen), nähert man sich dem wahren Mittelwert an.

Wird eine Stichprobe von  $n$  Fahrzeugen gezogen, berechnet man aus  $n$  Messergebnissen den Mittelwert. Wird nach dieser Stichprobe noch eine weitere Stichprobe mit der gleichen Anzahl von  $n$  Fahrzeugen gezogen und deren Mittelwert ermittelt so werden die beiden Mittelwerte nicht übereinstimmen. Zieht man noch eine Vielzahl weiterer zufälliger Stichproben des Umfanges  $n$ , dann kann die Streuung aller empirisch ermittelten Mittelwerte um den Populationsmittelwert ermittelt werden. Diese Streuung ist der Standardfehler. Da der Mittelwert der Stichprobenmittelwerte der beste Schätzer für den Populationsmittelwert ist, entspricht der Standardfehler der Streuung der empirischen Mittelwerte um den Populationsmittelwert. **Er bildet nicht die Streuung der Fahrzeuge, sondern die Genauigkeit des errechneten Mittelwerts ab. Für die vorliegende Fragestellung ist diese Genauigkeit des Mittelwerts gesucht, sie entspricht der gesuchten Unsicherheit des Verbrauchs oder der Emissionen.**

### 95 %-Unsicherheit

Entsprechend dem IPCC-Standard werden im vorliegenden Projekt die Unsicherheiten auf dem 95 %-Vertrauensniveau angegeben (respektive auf 5 %-Niveau Irrtumswahrscheinlichkeit). Im Fall einer Normalverteilung entspricht der Standardfehler dem 68 %-Vertrauensniveau. Um auf ein  $\alpha$ -Vertrauensniveau zu gelangen, muss der Standardfehler mit dem  $t_\alpha$ -Wert multipliziert werden, für  $\alpha = 95 \%$  ist  $t_{95\%} = 1.96 \approx 2$ .

### 3.1.4 Fehlerfortpflanzung

Es seien Inputdaten  $x_1, x_2, \dots$  mit ihren Unsicherheiten  $U_{x1}, U_{x2}, \dots$  gegeben

$$x_1 \pm U_{x_1}; \quad x_2 \pm U_{x_2} \dots$$

In einer Modellrechnung pflanzen sich die Unsicherheiten auf Outputdaten  $F$  fort:

$$\text{Output} = F(x_1, x_2, \dots) = F \pm U_F$$

Wie groß ist die Unsicherheit von  $F$  und wie wird sie berechnet?

$$U_F = f(U_{x_1}, U_{x_2}, \dots) = ?$$

Wenn Die Unsicherheiten der Inputdaten nicht „zu groß“, ungefähr normalverteilt und statistisch unabhängig voneinander sind, kann die gesuchte Unsicherheit des Outputs mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz nach Gauß berechnet werden:

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 \cdot U_{x_i}^2}$$

Das Gesetz kann auf *abhängige* Unsicherheiten verallgemeinert werden

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 \cdot U_{x_i}^2 + 2 \cdot \sum_{i < j} \rho_{x_i x_j} \frac{\partial F}{\partial x_i} \frac{\partial F}{\partial x_j} U_{x_i} U_{x_j}} \quad \rho_{x_i x_j} \in [-1, 1] \text{ Korrelationskoeff.}$$

Sind die Unsicherheiten groß und/oder weichen von der Normalverteilung ab, ergibt das Fehlerfortpflanzungsgesetz ungenaue Resultate. Dann können die Unsicherheiten der Outputs mit Monte-Carlo-Simulationen bestimmt werden. Dabei wird das gesuchte Resultat mit Zufallszahlen entsprechend der Inputdaten (Mittelwert und Häufigkeitsverteilung) gerechnet. Die Rechnung wird in großer Zahl wiederholt (typischerweise bis  $10^6$  Mal) und ergibt eine simulierte Häufigkeitsverteilung des Resultats, aus der Mittelwert und Streuung (-> Unsicherheit) abgeleitet werden können.

Für Monte-Carlo-Simulationen wird in der vorliegenden Studie die Software *Crystal Ball* benutzt. Sie ist ein Excel-basiertes Tool und bietet alle nötigen Optionen (Verteilungsfunktionen, Korrelationen).

## 4 Messdaten Straßenverkehr

### 4.1 Aktualisierung der Emissionsfaktoren Straßenverkehr

#### 4.1.1 Zwei Datenbanken mit Messwerten

In der laufenden Aktualisierung der Emissionsfaktoren wurden Messwerte zum Treibstoffverbrauch und zu den Abgasemissionen von leichten und schweren Motorwagen in Datenbanken abgelegt:

- Die Datenbank für leichte Motorwagen enthält Daten von Fahrzyklen von PKW und LNF, darunter Prüfzyklen, z.B. Legislative-NEDC, und „real world“ Zyklen aus dem Projekt Artemis (INFRAS 2009a).
- Die Datenbank für schwere Motorwagen enthält im Unterschied zu den leichten Motorwagen keine Daten von Fahrzyklen, sondern von Messwerten über einem Kennfeld (Rexeis 2009).

#### 4.1.2 Datenbank für PKW und LNF

Eine wichtige Basis für die Bestimmung der Unsicherheit von Emissionsfaktoren ist die sog. „A300DB“-Datensammlung. Diese Datenbank mit Beutelwert-Emissionsmessergebnissen umfasst einen Großteil der in den vergangenen Jahren in verschiedenen europäischen Messlabors gemessenen Pkw und leichten Nutzfahrzeuge (<3.5 t). Die Datenbank wurde im Rahmen des EU-Forschungsprojekts ARTEMIS von INFRAS und Inrets zusammengestellt (INFRAS 2005, Inrets 2005) und wird von INFRAS laufend aktualisiert. Sie umfasst heute die Messungen aller Fahrzeuge, die im Umfeld des Handbuchs für Emissionsfaktoren (HBEFA) in Deutschland (namentlich Feldüberwachungsprogramme), Österreich und in der Schweiz in den letzten rund 20 Jahren gemessen wurden, aber auch weitere Messungen, die im Rahmen verschiedener weiterer internationaler Forschungsvorhaben (wie COST 319, MEET, ARTEMIS, PARTICULATES u.a.m.) wie auch im Rahmen nationaler Projekte (z.B. in Schweden, Frankreich, Holland etc.) gemessen wurden. Die Datenbank enthält nicht nur Ergebnisse von Normzyklen, sondern auch von verschiedenen „real world“-Zyklen, allen voran den sog. CADC (Common Artemis Driving Cycles, Inrets 2004) sowie den sog. Handbuch-Zyklen (INFRAS et.al. 2000).

Die nachstehenden zwei Tabellen zeigen einerseits die Zahl der Fahrzeuge mit verfügbaren Messungen, differenziert nach Kraftstoff-Typ und Euro-Stufe bzw. die Art und den Umfang von Fahrzeug-Messungen in den diversen Fahrzyklen.

**Tab. 4 Anzahl Datensätze in der Messdatenbank nach Euro-Klassen**

VehCat	fuel_type	NrOfVeh	pre-EURO-	EURO-1	EURO-2	EURO-3	EURO-4
pass. car	diesel	578	207	48	54	137	121
pass. car	gasoline	2610	878	1191	164	157	217
Sum PC		3188	1085	1239	218	294	338
LCV	diesel	86	24	20	30	5	7
LCV	gasoline	64	23	36	5		
Sum LCV		150	47	56	35	5	7
Sum PC+LCV		3338	1132	1295	253	299	345

**Tab. 5 Anzahl Datensätze in der Messdatenbank nach Fahrzyklen**

Fuel Type	Euro-Class	CycleTyp				
		CADC (Bag)	BAB	HBEFA (Real World)	Legislative-FTP	Legislative-NEDC
Gasoline	PreEuro	7	241	6	310	834
	Euro1	9	90		842	642
	Euro2	33	68	25	110	114
	Euro3	88	89	26	101	155
	Euro4	164	29	22	59	220
Diesel	PreEuro	2	35		81	177
	Euro1	5	10	2	8	17
	Euro2	31	17	10	26	48
	Euro3	62	55	11	66	133
	Euro4	82	16	18	34	116

Für die unten folgende Einteilung der Euro-Klassen in „konventionell“ (KO) und „mit Minderungstechnik“ (MT) sei bereits an dieser Stelle erwähnt, dass „PreEuro“-Fahrzeuge, unten auch mit „Euro0“ bezeichnet, der Klasse KO zugeordnet werden, Euro1 bis Euro4 der Klasse MT. Es ist zwar nicht ganz auszuschließen – und müsste im Detail noch abgeklärt werden – dass sich in der Datenbank unter Euro0 wenige Benzin-Fahrzeuge mit G-Kat befinden, die vom theoretischen Standpunkt gesehen zur Klasse MT gezählt werden müssten. Vom Standpunkt des Emissionsverhaltens aus gesehen, ist jedoch der entscheidende Sprung zur Senkung der Laufschatstoffe erst mit der Einführung von Euro1 passiert. Für die folgenden Rechengänge werden alle Euro0 Fahrzeuge als KO betrachtet, für allfällig falsch zugeordnete Euro0-Fahrzeuge mit G-Kat wird der Fehler toleriert. Diesel-Fahrzeuge der Euro0 Klasse sind ausnahmslos KO, hier ist keine falsche Zuordnung möglich. In Bezug auf die Unsicherheiten spielt die Klasse KO ohnehin nur noch eine untergeordnete Rolle, weil KO nur noch einen kleinen Teil der Fahrzeuge enthält und auch nur noch einen kleinen Anteil an der Fahrleistung hat (Größenordnung 1 %).

#### 4.1.3 Datenbank für schwere Nutzfahrzeuge

Die Datenbank für SNF wird vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz betrieben (Rexeis 2009). Sie ist die Basis für die Bestimmung von Emissionsfaktoren, die im oben erwähnten „Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA)“ enthalten sind (INFRAS 2004b, 2009b).

Die Messdaten, die für die Unsicherheitenanalyse benutzt werden, stammen aus der Messkampagne für die Aktualisierung des Handbuchs im laufenden Jahr.

## 4.2 Nutzung der Messdaten für die Unsicherheitenrechnung

### 4.2.1 PKW

Die Datenbank INFRAS (2009a) enthält zahlreiche Messwerte von Prüfzyklen, die für die vorliegende Fragestellung nicht geeignet sind, weil sie nicht mit der Differenzierung auf Ebene 5 zusammenpassen. Konkret lassen sich die Prüfzyklen nicht einer einzigen Straßenkategorie zuordnen. Hingegen enthält es unter den so genannten „real-world“ Zyklen für Fahrten innerorts, außerorts und auf Autobahnen, die mit der Differenzierung auf Ebene 5 kompatibel sind. Die folgende Tabelle zeigt, welche Zyklen für die Berechnung von Unsicherheiten verwendet werden.

**Tab. 6 Fahrzyklen und Zuordnung zu den Straßenkategorien.**

Fahrzyklen	Strassenkategorie
ART.MW_130_3-hot	AB
ART.MW_130_4-hot	AB
ART.MW_130-hot	AB
ART.MW_150_1-hot	AB
ART.MW_150_2-hot	AB
ART.MW_150_3-hot	AB
ART.MW_150_4-hot	AB
ART.MW_150-hot	AB
ART.rural_1-hot	AO
ART.rural_2-hot	AO
ART.rural_3-hot	AO
ART.rural_4-hot	AO
ART.rural_5-hot	AO
ART.rural-hot	AO
ART.urban_1-cold	IO
ART.urban_1-hot	IO
ART.urban_2-cold	IO
ART.urban_2-hot	IO
ART.urban_3-cold	IO
ART.urban_3-hot	IO
ART.urban_4-cold	IO
ART.urban_4-hot	IO
ART.urban_5-cold	IO
ART.urban_5-hot	IO
ART.urban-cold	IO
ART.urban-hot	IO
Legisl.US_FTP1-cold	IO
Legisl.US_FTP2-hot	AO
Legisl.US_FTP3-hot	IO

ART, Artemis, MW Motorway, FTP Federal Test Procedure (USA), AB/AO/IO Autobahn, außerorts, innerorts

Unter den verwendeten Zyklen stehen ca. 1200 Datensätze in der Datenbank für die Auswertung zur Verfügung. Ein Datensatz umfasst typischerweise den gemessenen Verbrauch pro km sowie die Emissionen pro km für die Schadstoffe CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, HC (VOC), NO<sub>x</sub>.

Wie können die Messdaten für die Unsicherheitenrechnungen genutzt werden? Typischerweise gibt es mehrere Fahrzeuge mit demselben Abgaskonzept, die in ein und demselben Zyklus abgefahren werden. Für diese Fahrzeuge werden Mittelwert und Standardabweichung der Verbrauchs- und der Emissionsfaktoren berechnet. Die Standardabweichung ist das Maß für die **Streuung der Faktoren zwischen den Fahrzeugen**; darüber hinaus enthält sie auch noch **Messabweichungen**<sup>3</sup>. Aus den Standardabweichungen werden die **Standardfehler der Mittelwerte** berechnet, indem die Standardabweichungen durch die Wurzel aus der Anzahl gemessener PWK dividiert werden (siehe Kap. 3.1.3). Bevor sie als Inputgrößen für die Bestimmung der Unsicherheiten auf der Ebene 5 benutzt werden können, braucht es zwei Mittelungsschritte:

- Schritt 1: Mittelwert über Zyklen
- Schritt 2: Mittelwert über Euroklassen.

#### Schritt 1: Mittelwert über Zyklen:

Die Standardfehler je Fahrzyklus werden durch die Mittelwerte dividiert, was die relativen Standardfehler ergibt. Dann werden die Zyklen nach Straßenkategorien AB, AO, IO gruppiert (Tab. 6). Je Straßenkategorie werden die Varianzen (Quadrate der Standardfehler) arithmetisch gemittelt und daraus die Wurzel gezogen. Das Resultat gibt die Standardfehler je Straßenkategorie und je Euro-Klasse. Sie werden noch mit dem Faktor 2 multipliziert zwecks Übergang vom 68 %- zum 95 %-Vertrauensintervall.

$$U_{SK, Euro, Kraftstoff, Schadstoff} (95\%) = 2 \cdot s_{SK, Euro, Kraftstoff, Schadstoff}$$

$$= 2 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{Zykl} s_{SK, Euro, Kraftstoff, Schadstoff, Zykl}^2}{N_{SK, Euro, Kraftstoff, Schadstoff, Zykl}}}$$

SK = AB, AO, IO

Euro = Euro 0, ..., 4

Kraftstoff = Benzin, Diesel

Schadstoff = Verbrauch, CH<sub>4</sub>, NMVOC, NO<sub>x</sub> (CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub>O werden separat abgehandelt)

Zykl = Fahrzyklen gemäß Tab. 6

Insgesamt gibt es 150 solche Gleichungen für 3 Straßenkategorien, 5 Euro-Klassen, 2 Kraftstoffe, 3 „Schadstoffe“:  $90 = 3 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 3$ .

#### Schritt 2 zur Ausmittlung der Euro-Klassen

wird in den Kap. 5.2 und Kap. 6.2 beschrieben.

#### Spezialfälle CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub>O

In der Datenbank sind zwar CO<sub>2</sub>- und N<sub>2</sub>O-Messungen vorhanden, sie werden aber für die vorliegende Untersuchung nicht benutzt. Fürs CO<sub>2</sub> können die wesentlich genaueren Messdaten zum Kohlenstoff-Gehalt der Kraftstoffe verwendet werden. Beim N<sub>2</sub>O sind

<sup>3</sup> diese sind aber nach Aussage der Messtechniker wesentlich geringer als die Streuung zwischen den Fahrzeugen

Messdaten von 18-20 Jahre alten PKW (ohne Minderungstechnik) vorhanden, die für den heutigen Wagenpark nicht mehr repräsentativ sind. Aus diesem Grund musste auf die Nutzung der Datenbank für N<sub>2</sub>O verzichtet werden.

Unten im Kap. 6.2.1 d) und e) sind die Vorgehensweisen für CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub>O beschrieben.

### Kommentar zur Nutzung der Datenbank

Die oben beschriebene Nutzung der Datenbank zur Berechnung der Unsicherheiten von Verbrauch und Emissionen ist nicht unproblematisch. Einige Aspekte seien an dieser Stelle genannt:

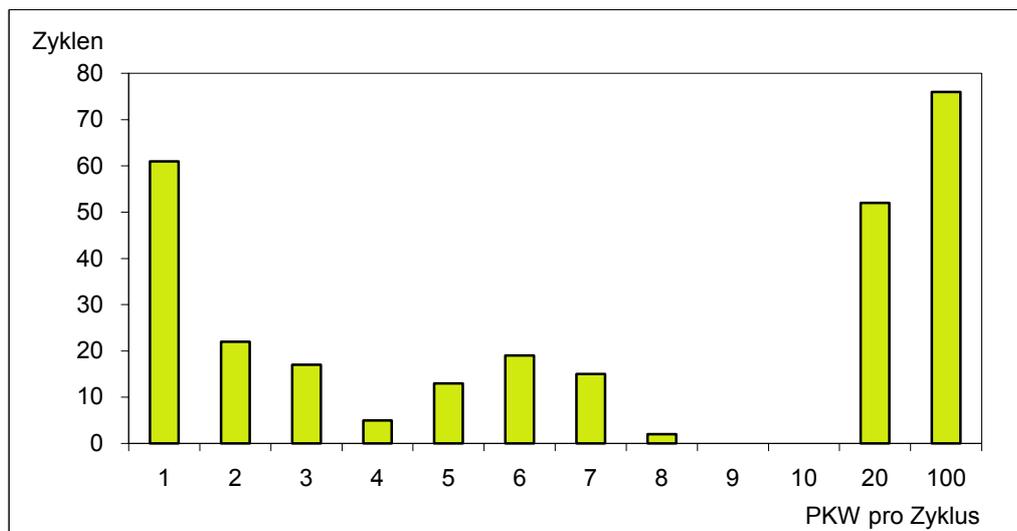
- Die Emissionsfaktoren 2007, die in TREMOD zur Berechnung der Emissionen 2007 benutzt werden, stammen aus früheren Messkampagnen als die hier verwendeten Messdaten<sup>4</sup>. Wenn nun die neuen Messdaten für die Bestimmung der Unsicherheiten im Jahr 2007 verwendet werden, so wird vorausgesetzt, dass es zwischen den früheren und aktuellen Unsicherheiten keinen prinzipiellen Unterschied gibt. Selbstverständlich können Änderungen beim absoluten Niveau der Emissionsfaktoren vorkommen, es wird lediglich vorausgesetzt, dass die **relativen Unsicherheiten** sich nicht prinzipiell verändert haben. Auf eine Überprüfung der Voraussetzung muss im Rahmen der vorliegenden Analyse verzichtet werden.
- Die Emissionsfaktoren in TREMOD sind keine gemessenen Emissionsfaktoren aus den Fahrzyklen, sondern Faktoren, die sich auf einzelne Verkehrssituationen beziehen. Diese Verkehrssituationen sind Linearkombination aus Fahrmustern, die ihrerseits aus Messdaten von Zyklen abgeleitet wurden. Zwischen den Emissionsfaktoren, wie sie in der Messdatenbank vorliegen, und den TREMOD-Emissionsfaktoren liegen demnach noch **weitere Ausbreitungsschritte respektive eine Modellbildung**. *Wie verhält es sich mit den Unsicherheiten, wenn diese Schritte ebenfalls fehlerfortpflanzungstechnisch nachvollzogen werden könnten?* Grundsätzlich besteht die Aufbereitung in der Zerlegung integraler Messwerte in möglichst homogene (bezüglich Fahrgeschwindigkeit und Beschleunigung/Verzögerung) Motorenzustände und in einer anschließenden Zusammensetzung zu Verkehrssituationen, die charakteristische Fahrverhaltensweisen repräsentieren sollen. Bei der Zerlegung von Zyklen in homogene Abschnitte wird sich die relative Unsicherheit für jeden Abschnitt im Vergleich mit der relativen Unsicherheit für den gesamten Zyklus vergrößern. Bei der anschließenden Zusammensetzung von homogenen Abschnitten zu einer Verkehrssituation wird sich umgekehrt die relative Unsicherheit wieder verringern. Das ist eine Folge der Fehlerfortpflanzung: Die relativen Unsicherheiten von Summanden sind größer als die relative Unsicherheit der Summe. Das folgt aus dem Umstand, dass sich Unsicherheiten von Summanden teilweise ausmitteln. Bei der Transformation von gemessenen Emissionsfaktoren zu Verkehrssituations-Emissionsfaktoren werden die Unsicherheiten somit zuerst vergrößert und anschließend wieder verkleinert. Es stellt sich die Frage, welcher Effekt dominiert. Die Frage kann aber nicht generell beantwortet werden, die Antwort hängt von den konkreten Details bei Zerlegung und Zusammensetzung ab; netto kann die Unsicherheit größer oder kleiner werden, beide Möglichkeiten können vorkommen. In der vorliegenden Analyse werden die Zwischenschritte Zerlegung und Zusammensetzung d.h. die Modellbildung gänzlich vernachlässigt. Das ist gleichbe-

---

<sup>4</sup> Eine Übernahme der hier verwendeten aktuellen Emissionsfaktoren in TREMOD erfolgt nach Fertigstellung des HBEFA und kann aber erst in der nächsten Berichtsphase im NIR berücksichtigt werden

deutend mit der Annahme, dass die relativen Unsicherheiten der Zykluswerte gleich groß sind wie die Unsicherheiten der TREMOD-Emissions-/Verbrauchs-faktoren, dass sich also die gegenläufigen **Vergrößerungen und Verkleinerungen im Mittel ungefähr kompensieren**. Auf eine vertiefte Analyse dieser Frage kann im Rahmen des Projekts nicht eingegangen werden.

- Ein weiteres Problem in der Anwendung der Daten aus der Messdatenbank ist die geringe Zahl von Messdaten. Zwar sind 1200 Datensätze in der Datenbank verfügbar, aber es sind 5 Schadstoffe, 5 Euroklassen und 2 Kraftstoffe, sodass im Durchschnitt  $1200 \div (5 \cdot 5 \cdot 2) = 24$  Messwerte pro Zyklus vorliegen. Allerdings sind die Zyklen sehr unterschiedlich besetzt wie die folgende Abb. zeigt. Über 60 Zyklen wurden lediglich von 1 PKW befahren. Für diese Zyklen kann keine Standardabweichung berechnet werden. Mehr als 20 Zyklen wurden lediglich von 2 PKW befahren, die Unsicherheit ist in diesen Fällen gleich der Differenz zwischen den beiden Messwerten multipliziert mit  $\sqrt{2}$ <sup>5</sup>, die Repräsentativität ist dabei höchst ungewiss. Weitere ca. 70 Zyklen sind mit 3 bis 8 PKW belegt. Auch das sind immer noch relativ wenige Messdaten, um als repräsentativ gelten zu können. In knapp 60 Zyklen sind 20-100 PKW vertreten, für diese Zyklen ist die Repräsentativität vermutlich hoch. In weiteren knapp 80 Zyklen sind mehr als 100 PKW vertreten, allerdings handelt es sich praktisch nur um FTP-Zyklen, die weniger realitätsnah gelten als die Artemis-Zyklen.



**Abb. 4 Belegung der Fahrzyklen mit PKW. Erläuterungen siehe Text. Quelle: INFRAS 2009a.**

#### 4.2.2 SNF

Für die schweren Nutzfahrzeuge gibt es wie erwähnt eine zu den PKW vergleichbare Datenbank mit Messdaten. Für die vorliegende Untersuchung wurden Daten zur Unsicherheit von der TU Graz zur Verfügung gestellt (Tab. 14) (Rexeis 2009). Es handelt sich um Unsicherheiten zum Treibstoffverbrauch und zu den Schadstoffen NO<sub>x</sub>, CO, HC (VOC)

<sup>5</sup>  $U = 2s = \sqrt{2} \cdot (m_1 - m_2)$

sowie Partikel. CO und Partikel werden in der vorliegenden Analyse nicht weiter betrachtet, die Angaben zu den VOC werden als Proxi für NMVOC und CH<sub>4</sub> verwendet. Für N<sub>2</sub>O liegen keine Messdaten vor. Das weitere Vorgehen ist in Kap. 6.2.1 dargestellt in dem auch der Spezialfall CO<sub>2</sub> beschrieben ist

Die Datenstruktur entspricht bei den SNF-Daten der TU Graz nicht der des ZSE. Insbesondere ist keine Differenzierung nach Straßenkategorien verfügbar. Weil die Unsicherheitenrechnung in der ZSE-Struktur ausgeführt wird, werden in jeder Straßenkategorie dieselben Unsicherheiten für die Verbrauchs- und Emissionsfaktoren eingesetzt.

### 4.2.3 Übrige Fahrzeugkategorien LNF, Busse, MZR

Für die leichten Nutzfahrzeuge sind zwar ebenfalls Messdaten in der Datenbank INFRAS (2009a) vorhanden, allerdings in weit geringerer Anzahl als für PKW. Weil bereits bei den PKW die Belegung mangelhaft ist, können die Messdaten für LNF nicht mit genügender Repräsentativität ausgewertet werden. Mangels Daten wird deshalb angenommen, dass die relativen Unsicherheiten<sup>6</sup> für die PKW-Faktoren auch für die LNF-Faktoren gelten, und zwar auf der Ebene 5. D.h. es werden die relativen Unsicherheiten für Diesel- und Benzin-LNF nach Straßenkategorie und Minderungstechnik (KO/MT) übernommen.

Auch für Motorräder und Mopeds gibt es keine vergleichbaren Messwerte. Deshalb wird für diese Fahrzeugkategorie wie für die LNF angenommen, dass die relativen Unsicherheiten denen der Benzin-PKW entsprechen.

Für die Busse stehen schließlich auch keine eigenen Messdaten für die Unsicherheitenrechnung zur Verfügung. Es wird analog angenommen, dass die relativen Unsicherheiten denen der SNF entsprechen.

---

<sup>6</sup> Es wird selbstverständlich nicht angenommen, dass Verbrauchs- und Emissionsfaktoren der LNF gleich groß sind wie bei den PKW, und auch die *absoluten* Unsicherheiten werden nicht als gleich groß angenommen; lediglich die *relativen* Unsicherheiten der beiden Fahrzeugkategorien werden als gleich groß vorausgesetzt.

## 5 Bestimmung von Unsicherheiten der Aktivitätsraten

### 5.1 Vorgehen

#### Straßenverkehr

- Der Verbrauch wird in TREMOD aus Verbrauchsfaktoren und Fahrleistungen berechnet. Die nötigen Daten sind in TREMOD vorhanden, allerdings sind dort keine Informationen zu den Unsicherheiten angegeben – weder zu Verbrauchsfaktoren und Fahrleistungen noch zum Verbrauch selber – diese wurden bisher nicht untersucht.
- Für das ZSE wird der Verbrauch noch mit einem Anpassungsfaktor multipliziert, um den mit dem territorialen TREMOD berechneten Verbrauch auf den nationalen Absatz anzupassen. Das ist eine zusätzliche Quelle für die Unsicherheit.
- Im vorliegenden Projekt werden die Unsicherheiten des Verbrauchs mit einer Fehlerrechnung aus den Unsicherheiten der drei Faktoren Verbrauchsfaktor, Fahrleistung und Anpassungsfaktor berechnet.
- Als Inputs dienen, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, die Unsicherheiten der Verbrauchsfaktoren der PKW und der SNF. Für LNF und Motorräder werden die relativen Unsicherheiten der PKW übernommen, für die Busse analog die relativen Unsicherheiten der SNF.
- Eine weitere Eingangsgröße ist die Unsicherheit der Fahrleistungen. Dazu wurden die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen und Expertenschätzungen herangezogen und verglichen. Anders als bei den Verbrauchsfaktoren liegen die Fahrleistungen nur für die Gesamtfahrleistung verschiedener Fahrzeug- oder Straßenkategorien vor, eine Differenzierung anhand der Minderungstechnik ist nicht möglich. Dementsprechend lassen sich auch die Unsicherheiten nur in dieser Differenzierung ableiten (siehe Kap. 2.6.1). Für den Berechnungsablauf werden geschätzte Unsicherheiten auf der Ebene 5 eingesetzt und durch Aggregieren auf Ebene 2 berechnet. Die Unsicherheiten auf Ebene 5 werden so gewählt, dass die Resultate auf Ebene 2 mit den Expertenschätzungen für den Gesamtverkehr in etwa übereinstimmen (siehe Kap. 5.2.1).
- Der oben erwähnte Anpassungsfaktor ergibt sich aus dem Vorgehen für die Erstellung der nationalen Energiebilanz: Die Absatzzahlen für Benzin und Diesel für Schienenfahrzeuge (1.A.3.c) Schiffe (d) und Baumaschinen (e) werden bestimmt und der Rest des Absatzes dem Straßenverkehr (1.A.3.b) zugeschlagen. Fehler bei den Verbrauchsangaben für 1.A.3.c bis e werden auf diese Weise auf 1.A.3.b übertragen.
- Die Fehlerrechnungen werden mit einer Monte Carlo Simulation umgesetzt.

#### Übrige Verbraucher

Für den Schienen-, Schiffs- und bauwirtschaftlichen Verkehr werden die Aktivitätsraten auf Ebene 2 benötigt. Die entsprechenden Werte werden im ZSE direkt aus der Energiebilanz entnommen bzw. – beim bauwirtschaftlichen Verkehr – aus dem Gesamtwert des Sektors „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen u. übrige Verbraucher“ (Energiebilanzzeile 67) mit Hilfe eines konstanten Faktors herausgerechnet (siehe Kap. 2.6.4).

Für den Schienenverkehr lässt sich mit den vorliegenden Informationen, die IFEU und MWV von der DB AG und dem Verband Deutscher Verkehrsunternehmen bekommen ha-

ben, sowie der Energiebilanz eine Fehlerrechnung durchführen. Die Unsicherheiten für die Aktivitätsraten der Binnenschifffahrt und Bauwirtschaft werden zwar aus den vorliegenden wenigen Werten berechnet, sind aber wegen der eher zufällig zusammengestellten wenigen Werte nur als Schätzungen zu verstehen. Grundlage sind die offiziellen Angaben der AG Energiebilanzen und des MWV, die Erläuterungen des MWV zu den Angaben in der Energiebilanz (MWV 2009b) sowie die Untersuchungen und Berechnungen von IFEU im Rahmen von TREMOD und TREMOD MM.

## **5.2 Unsicherheiten Aktivitätsraten Straßenverkehr**

### **5.2.1 Inputdaten und Unsicherheiten auf Ebene 5**

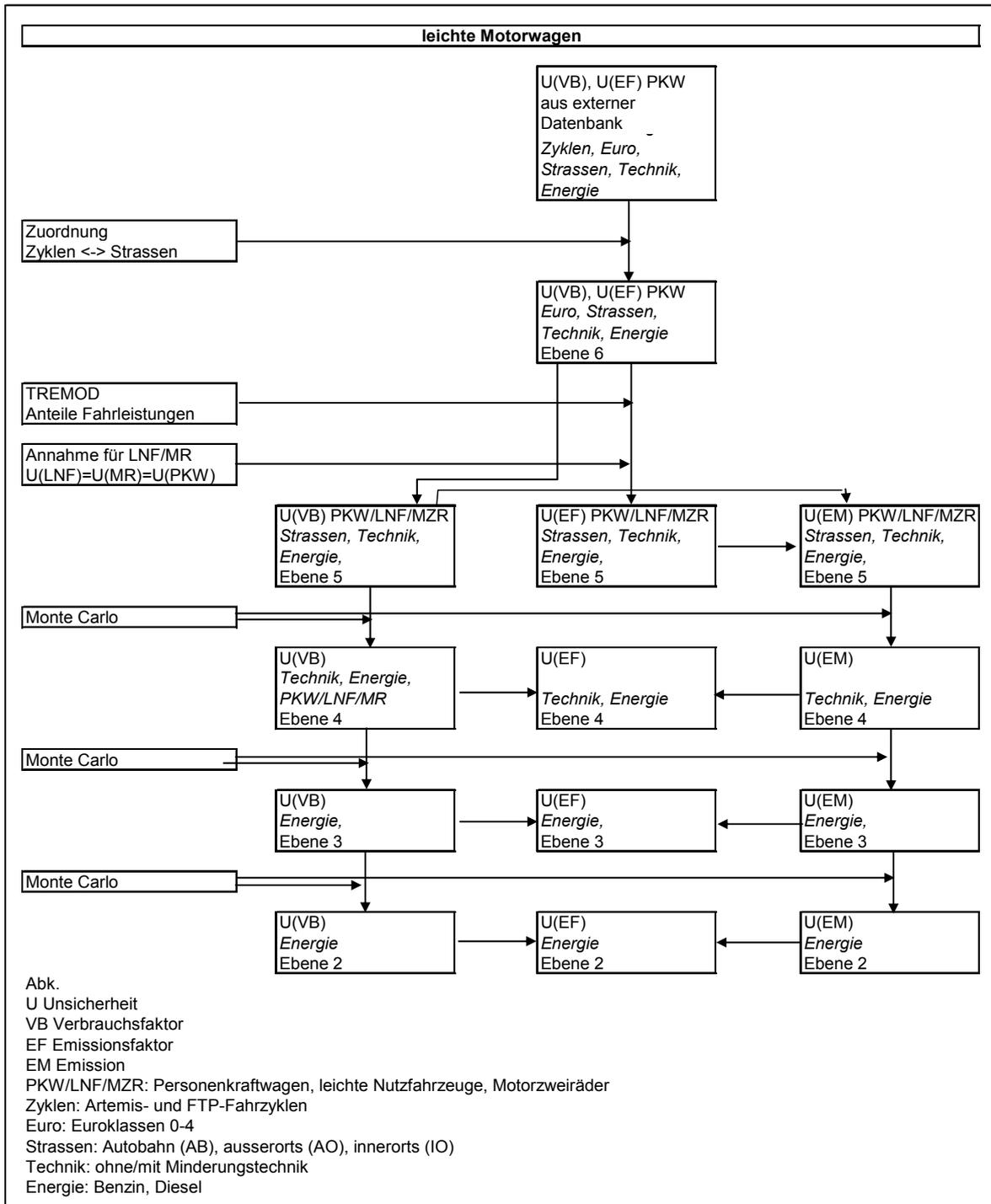
#### **a) Unsicherheiten Verbrauchsfaktoren Ebene 5**

Die Unsicherheiten aus den Messdatenbanken (Kap. 4.2) gelten je Abgaskonzept und Straßenkategorie. Durch Aggregieren der Abgaskonzepte Euro1 bis Euro4 wird eine Segmentierung der Daten erreicht, die der Ebene 5 entspricht.

Um Kompatibilität mit Ebene 5 zu erreichen, werden konkret (siehe auch 4.2.1):

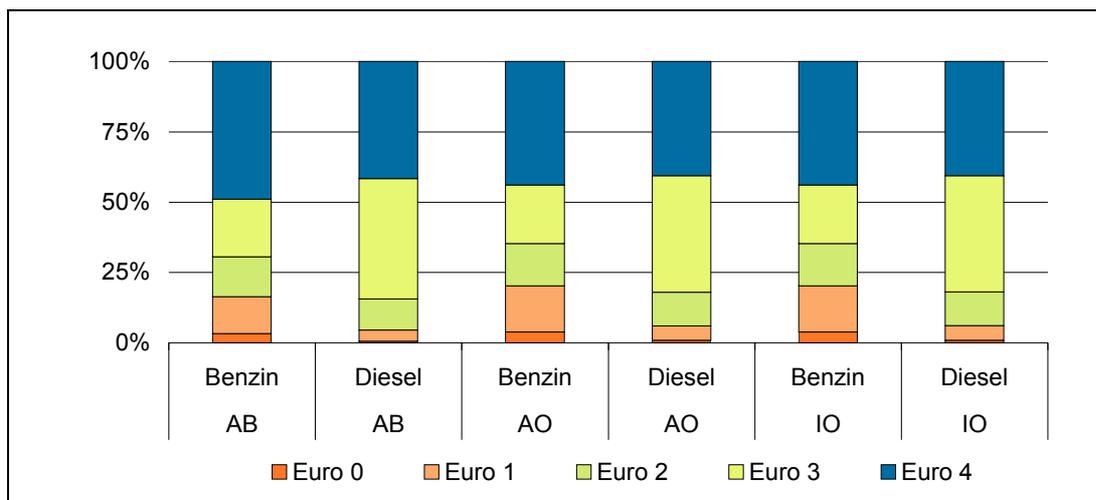
- absolute Unsicherheiten je Straßenkategorie, Abgasstufe und Treibstoffart als Mittelwert über die zur betreffenden Straßenkategorie gehörenden Zyklen berechnet (z.B. Autobahnzyklen). Dieser Rechengang wurde in Kap. 4.2.1 mit „Schritt 1“ bezeichnet.
- Für die Klasse „mit Minderungstechnik“ werden gewichtete Mittelwerte der (absoluten) Unsicherheiten über die Euro-Klassen 1 bis 4 gebildet. Als Gewichtungsfaktoren dienen die Fahrleistungsanteile je Euro-Klasse. (Dieser Rechengang wurde in Kap. 4.2.1 mit „Schritt 2“ bezeichnet.) Die Mittelung wird nicht über die Standardfehler, sondern über deren Varianzen, d.h. die Quadrate der Standardfehler, gebildet.
- Für die Klasse „ohne Minderungstechnik“ bräuchte es zwar auch eine Mittelung über Euro0 und allenfalls noch in Betrieb stehende ältere Fahrzeuge. Für solche älteren PKW sind aber keine Messdaten für die Unsicherheit vorhanden, sodass nur die Klasse Euro0 berücksichtigt wird. Der Fehler, der damit in Kauf genommen werden muss, ist aufgrund des sehr geringen Fahrleistungsanteils der älteren PKW aber klein.
- Abschließend werden die Standardfehler mit dem Faktor 2 multipliziert und so die 95 %-Unsicherheiten ermittelt.

Die folgende Abbildung zeigt das Vorgehen in schematischer Form.



**Abb. 5 Vorgehen zur Bestimmung der Unsicherheiten für leichte Motorwagen (PKW, LNF, MZR), ausgehend von Messdaten (INFRAS 2009a).**

Die folgende Abbildung zeigt die Anteile der Fahrleistungen, die als Gewichtungsfaktoren bei der Mittelung über die Euro-Klassen benutzt werden.



**Abb. 6 Fahrleistungsanteile 2007 der PKW nach Straßenkategorie (AB, AO, IO) und Kraftstoff.** Quelle: TREMOD (IFEU 2009b)

In der folgenden Tabelle sind die Unsicherheiten (Standardfehler) der spezifischen Verbrauchsfaktoren je Euro-Klasse (U95 %) angegeben und die durch Mittelung über die Euro-Klassen resultierenden Unsicherheiten. Sie entsprechen in ihrer Differenzierung der Ebene 5 und werden als Input für die Monte Carlo Simulationen benutzt.

**Tab. 7: Standardfehler des spezifischen Energieverbrauchs (g/km) von PKW für alle Emissionskonzepte und gemittelte Werte für PKW „konventionell“ bzw. „mit Minderungstechnik“**

Str.kat.	Kraftstoff	Euro	Verbrauch (g/km)	Fahrl.anteil	U95%	Technik	U95% Ebene 5 gew Mittelwert
AB	D	0	51	1%	48%	KO	48%
AB	D	1	62	4%	58%	MT	14%
AB	D	2	62	11%	31%		
AB	D	3	52	43%	26%		
AB	D	4	58	42%	26%		
AB	B	0	68	3%	33%	KO	33%
AB	B	1	57	13%	33%	MT	12%
AB	B	2	57	14%	15%		
AB	B	3	59	20%	12%		
AB	B	4	64	48%	28%		
AO	D	0	51	1%	48%	KO	48%
AO	D	1	44	5%	39%	MT	11%
AO	D	2	51	12%	23%		
AO	D	3	45	41%	23%		
AO	D	4	47	41%	17%		
AO	B	0	58	4%	32%	KO	32%
AO	B	1	50	16%	23%	MT	7%
AO	B	2	52	15%	14%		
AO	B	3	51	20%	8%		
AO	B	4	53	43%	13%		
IO	D	0	75	1%	48%	KO	48%
IO	D	1	75	5%	31%	MT	11%
IO	D	2	79	12%	23%		
IO	D	3	73	41%	26%		
IO	D	4	78	41%	18%		
IO	B	0	102	4%	53%	KO	53%
IO	B	1	85	16%	31%	MT	10%
IO	B	2	85	15%	17%		
IO	B	3	84	20%	13%		
IO	B	4	91	43%	18%		

Anmerkung: Die Fahrleistungsanteile Euro 0-4 addieren sich zu 100% (wo dies nicht genau zutrifft, kommen noch geringe pre-Euro 0 PKW vor).  
Std.fehler: Standardfehler.

## b) Unsicherheiten Fahrleistungen

Die Fahrleistungen – als nationale Totale – werden vom DIW für jede Fahrzeugkategorie als Inländerfahrleistung berechnet. Für PKW und motorisierte Zweiräder wird die DIW-Inländerfahrleistung von IFEU in die Inlandsfahrleistung umgerechnet. Für die übrigen Fahrzeugkategorien (Busse, LNF und SNF) werden z.T. andere Quellen und Ansätze verwendet (siehe Kap. 2.4.1).

Zur Bestimmung der Unsicherheiten der Fahrleistungen lassen sich verschiedene Angaben heranziehen:

### Gesamtfahrleistung der Pkw

Für das Bezugsjahr 2002 liegen mit den Untersuchungen „Mobilität in Deutschland (MiD)“ (INFAS-DIW 2003), „Kraftverkehr in Deutschland (KiD)“ (IVS 2003) und der Fahrleistungserhebung (FLE) (IVT 2004) drei verschiedene Quellen mit unterschiedlichen Zielrichtungen und methodischen Ansätzen vor. Die Werte für die Inländerfahrleistung für Pkw liegen recht nahe beieinander: MiD ermittelte 590 Mrd. Fahrzeugkilometer, KiD 621 Mrd. km und die FLE 599 Mrd. km. Die maximale Differenz liegt somit bei 5 %.

Das DIW korrigierte aufgrund dieser neuen Erkenntnisse die Ergebnisse seiner Modellrechnung von 509,3 Mrd. km auf 583,6 Mrd. km, was einer Erhöhung von immerhin 15 % entspricht (DIW 2005). Hierzu ist allerdings anzumerken, dass es neun Jahre lang keine empirische Untersuchung zu den Fahrleistungen gab und das DIW somit über einen längeren Zeitraum auf unvollständige Informationen (Straßenverkehrszählungen) und unsichere Sekundärinformationen (Kraftstoffverbrauch) zurückgreifen musste. Somit können die 15 % Abweichung nicht als Hinweis auf eine generelle Unsicherheit in dieser Größenordnung gewertet werden.

Die FLE gibt für die relative Länge des Konfidenzintervalls (= Vertrauensbereich) der ermittelten mittleren Jahresfahrleistungen für die Pkw einen Wert von  $\pm 1,2$  % an. Bei den anderen Fahrzeugkategorien ist der Wert höher. Für die hochgerechnete Gesamtfahrleistung werden keine Angaben gemacht.

Wir schlagen daher vor, die Unterschiede der Ergebnisse für die Gesamtfahrleistung der verschiedenen Untersuchungen für das Jahr 2002 zugrunde zu legen und daraus die Unsicherheiten abzuleiten. Nimmt man vereinfacht eine Normalverteilung an, ergibt sich aus den drei Werten eine Standardabweichung von 2,6 % und damit eine Unsicherheit von 5,2 % für die Gesamtfahrleistungen der Pkw.

### **Gesamtfahrleistung der übrigen Kfz**

Für die übrigen Kfz liegen ebenfalls Ergebnisse für die Inländerfahrleistungen vor. Zusätzlich können Fahrleistungswerte für den Güterkraftverkehr aus der Güterverkehrsstatistik des KBA-GKE herangezogen werden.

Aus den drei Werten für die Inländerfahrleistung der Sattelzüge (FLE: 16,3 Mrd. km, KiD: 18,7 Mrd. km, KBA/DIW: 13,7 Mrd. km) ergibt sich eine Standardabweichung von 15,4 % und damit – unter Annahme einer Normalverteilung – eine Unsicherheit von 31 %. Bei den Lkw (Summe leichte und schwere Lkw inkl. Lastzügen) ergibt sich aus drei Werten (DIW: 58,2 Mrd. km, FLE: 60,2 Mrd. km, KiD: 55,6 Mrd. km) eine Unsicherheit von 8 %. Bei den Bussen schließlich errechnet sich, allerdings auf der schwachen Basis von nur zwei Werten (DIW: 3,6 Mrd. km, FLE: 4,2 Mrd. km), eine Unsicherheit von 22 %.

Aufgrund der geringen Anzahl an Werten und der vereinfachten Annahme einer Normalverteilung sind die oben berechneten Unsicherheiten nur sehr eingeschränkt belastbar. Generell legen die Zahlen den Schluss nahe, dass die Unsicherheiten bei Fahrzeugkategorien mit geringerer Fahrleistung (und großer Heterogenität in den Nutzungsmustern) größer sind als bei den Pkw. Wegen der geringen Belastbarkeit schätzen wir daher, dass die Unsicherheit der Gesamtfahrleistung für alle Fahrzeugkategorien zwischen 5 % und 10 % liegt. Da die Unsicherheit der Gesamtfahrleistung (Ebene 3) ein Ergebnis der Unsicherheiten auf Ebene 4 (Fahrleistungen nach Minderungstechnik) und Ebene 5 (Fahrleistungen nach Straßenkategorien) ist, kann das Ergebnis als plausibel betrachtet werden, wenn es in diesem Bereich liegt.

### **Fahrleistungen auf Autobahnen, Bundes- und Landesstraßen**

Aus den Verkehrszählungen auf Autobahnen (AB) und Außerortsstraßen (AO) werden die jährlichen Fahrleistungen der Fahrzeugkategorien abgeleitet (siehe Kap. 2.4.1). Angaben zu den Unsicherheiten der in den Straßenverkehrszählungen ermittelten Fahrleistungen finden sich in einem Methodenband zur Vorbereitung der Straßenverkehrszählung 2000 (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 59). In diesem Bericht werden verschiedene Hochrechnungsmethoden angewandt, um die Fehlerbandbreite bei Optimierung des Zählverfahrens (Häufigkeit der Zählungen, Dauer und Zeitfens-

ter der Zählungen u.a.) abzuschätzen. Die angegebenen Fehler liegen im Bereich von etwa 5 bis 8 %. Signifikante Unterschiede zwischen den Straßenkategorien sind nicht festzustellen. Da das Autobahnnetz vollständig und das Netz der übrigen Außerortsstraßen nicht vollständig erfasst ist, kann die Unsicherheit auf den übrigen Außerortsstraßen tendenziell höher angesetzt werden als auf Autobahnen.

### Fahrleistung auf Innerortsstraßen

Die Fahrleistung der Innerortsstraßen wird als Differenz zwischen den nationalen Totalen und den AB-/AO-Fahrleistungen berechnet.

$$FL_{IO} = FL_{national} - FL_{AB} - FL_{AO}$$

Aus den Unsicherheiten der AB- und AO-Unsicherheiten kann die IO-Unsicherheit bestimmt werden. (Diese kann sehr groß werden, weil es sich um eine Differenzgröße handelt)

$$U_{FL_{IO}} = \sqrt{U_{FL_{national}}^2 + U_{FL_{AB}}^2 + U_{FL_{AO}}^2}$$

Für die Berechnung der Unsicherheiten für die Gesamtfahrleistung aller Fahrzeugkategorien schlagen wir aufgrund der vorliegenden Informationen verschiedene Werte für die Gesamtfahrleistung (5 %), für Autobahnen (7 %) und für die übrigen Außerortsstraßen (9 %) vor. Die Unsicherheit für die Innerortsstraßen ergibt dann gemäß der obigen Formel 20 %.

**Tab. 8 Unsicherheit (95 %) der Fahrleistungen auf den Straßenkategorien.**  
(Die Unsicherheit der Innerortsstraßen wird aus den Unsicherheiten der übrigen Kategorien und des Totals abgeleitet)

Unsicherheiten der Gesamtfahrleistung		
Gesamt		5%
	Autobahn	7%
	Außerorts	9%
Daraus	Innerorts	20%

### c) Unsicherheit der Anpassungsfaktoren Benzin und Diesel

Die Faktoren für Benzin und Diesel zur Anpassung des TREMOD-Verbrauchs an die nationalen Absatzzahlen sind mit einem Fehler behaftet, der sich aus den Fehlern der Verbrauchsschätzungen für Baumaschinen, Schiffe etc. ergibt. Dieser Fehler ist systematischer Natur und ist nicht bekannt. Für die Monte Carlo Simulation wird ein Schätzwert angenommen. Solange die Unsicherheit kleiner als 5 % angenommen wird, bleibt der Einfluss auf die gesamte Unsicherheit der Emissionen beschränkt.

### d) Unsicherheiten Heizwerte Benzin und Diesel

Der Verbrauch ist das Produkt aus Verbrauchsfaktoren  $[m_{kr}] = 1 \text{ g/Fzgkm}$  und Fahrleistungen in  $[FL] = 1 \text{ Fzgkm}$  und hat entsprechend die Einheit einer Masse:

$$[V] = [m_{kr}] \cdot [FL] = 1 \text{ g / Fzgkm} \cdot 1 \text{ Fzgkm} = 1 \text{ g} .$$

Im ZSE sind werden Verbräuche aber in Energieeinheiten (z.B. [MJ]) angegeben. Die Masse muss deshalb noch mit dem Heizwert der Kraftstoffe multipliziert werden. Weil auch die Heizwerte eine, wenn auch geringe, Unsicherheit besitzen, muss diese in der Umrechnung auf Energieeinheiten mit berücksichtigt werden.

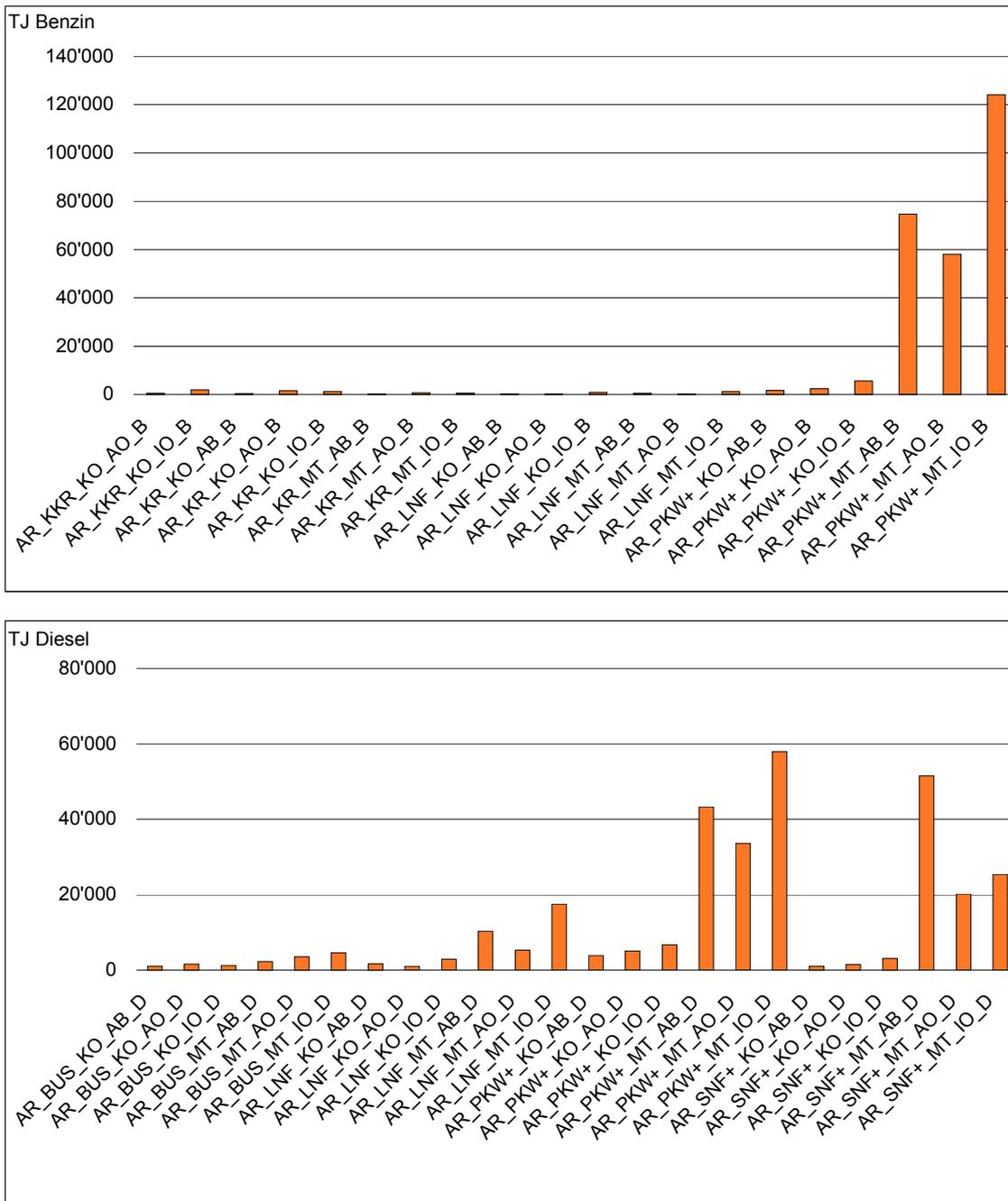
Dazu steht eine Untersuchung des Öko-Instituts zur Verfügung: Die Größenordnung der Unsicherheit liegt bei ca. 0,5 %. Bei einer Unsicherheit des Verbrauchs (in Gramm [g]) in der Größe von 5,00 %, so würde nach der Umrechnung von [g] auf [MJ] die Unsicherheit auf 5.02 % erhöht. Das zeigt, dass die Unsicherheiten im Heizwert Benzin und Diesel keinen wichtigen Beitrag in der Bestimmung der Unsicherheiten darstellt; sie werden deshalb vernachlässigt.

#### **e) Unsicherheiten Aktivitätsraten Ebene 5**

Die folgenden Abbildungen zeigen die berechnete absolute (Abb. 7) und relative (Abb. 8) Unsicherheit der Aktivitätsraten differenziert nach Fahrzeugkategorien und Straßenkategorien (Benzin /Diesel).

- Bei den Benzin-Fahrzeugen dominieren bei den absoluten Unsicherheiten erwartungsgemäß die PKW mit Minderungstechnik. Sie dominieren ja bereits ganz klar den Verbrauch, und so auch die Unsicherheit des Verbrauchs. Die Unsicherheiten bei den konventionellen PKW, bei den LNF und bei den Motorrädern sind vergleichsweise unbedeutend.
- Bei den Diesel-Fahrzeugen kommen die größten Beiträge zur absoluten Unsicherheit von den PKW mit Minderungstechnik und von den SNF mit Minderungstechnik. Auch von den LNF kommen noch nennenswerte Beiträge dazu, die größten von Innerortsstraßen.

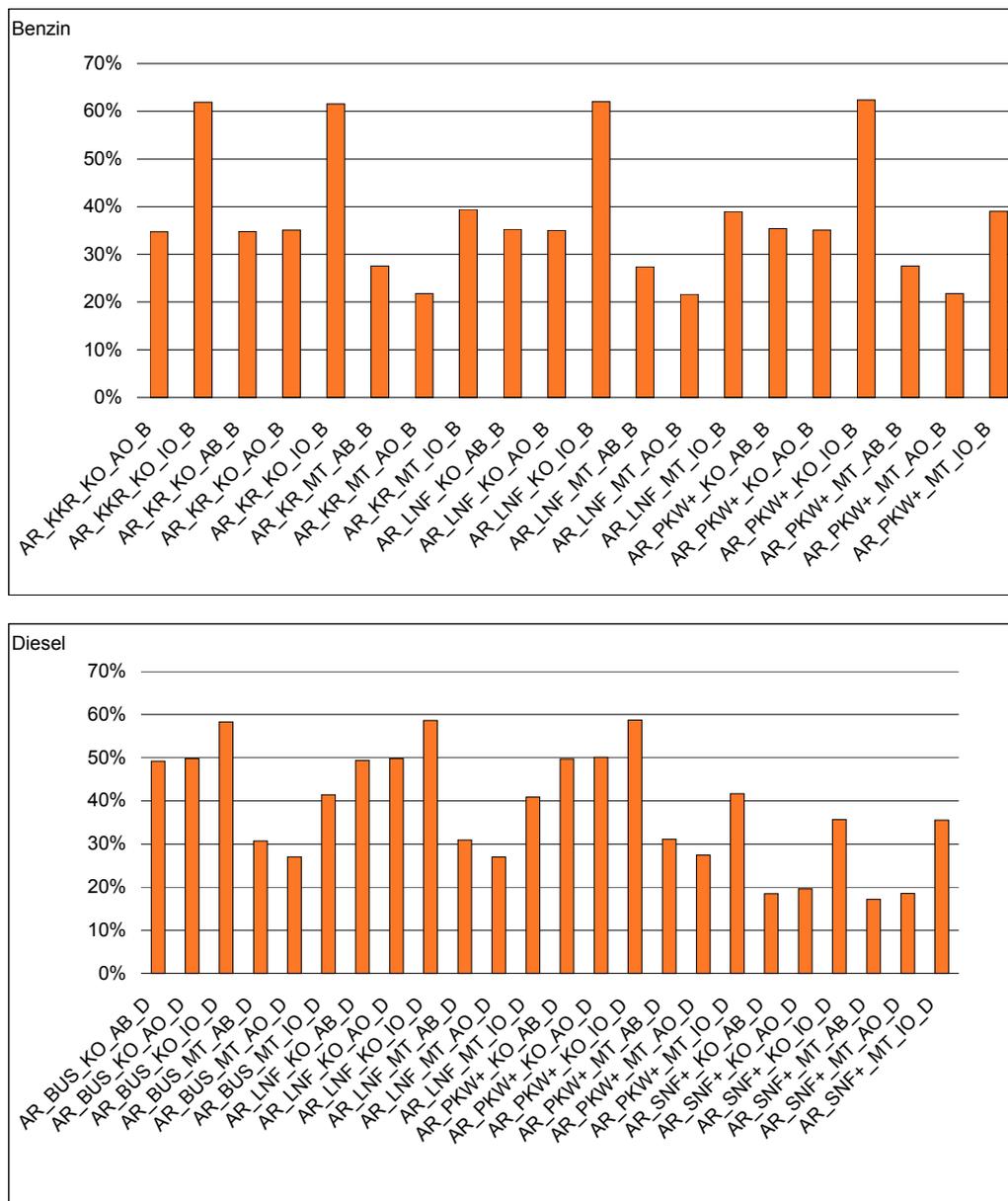
Dieses Bild der absoluten Unsicherheiten entspricht dem Verhältnis zwischen den Fahrleistungen der verschiedenen Fahrzeugkategorien.



**Abb. 7 Unsicherheiten der Aktivitätsraten Straßenverkehr 2007 (absolut in TJ).** Oben Benzin, unten Diesel. Kodierung x-Achse: (Aktivitätsrate)\_(Fz.kat.)\_(Minderungstechnik)\_(Straßenkategorie)\_(Kraftstoff).

- Bei den Benzin-Fahrzeugen liegen die relativen Unsicherheiten im Bereich 20 bis 40 % auf Außerortsstraßen und Autobahnen, bei den Innerortsstraßen bei 40 % für Fahrzeuge mit Minderungstechnik, 60 % für Fahrzeuge ohne Minderungstechnik. Die höhere Unsicherheit innerorts ergibt sich aus der hier mehr als doppelt so hohen Unsicherheit der Fahrleistung (gegenüber außerorts und Autobahnen). Die höhere Unsicherheit bei Fahrzeugen ohne Minderungstechnik resultiert aus der höheren Unsicherheit der Verbrauchsfaktoren (siehe Tab. 7). Die relativen Unsicherheiten der Aktivitätsraten außerorts und auf Autobahnen liegen bei den meisten Fahrzeugkategorien in einer ähnlichen Größenordnung.

- Bei den Diesel-Fahrzeugen haben ebenfalls die Innerortsstraßen die höchsten relativen Unsicherheiten (60 %). Allerdings sind die Unterschiede zu den übrigen Straßenkategorien weniger groß.
- Die relativen Unsicherheiten der SNF sind mit knapp 20 % (AB, AO) und ca. 35 % (IO) deutlich geringer als bei den übrigen Fahrzeugkategorien. Dieses Phänomen wird sich auch bei den Emissionen zeigen (siehe Kap. 6.2).



**Abb. 8 Relative Unsicherheiten Aktivitätsraten Straßenverkehr 2007 (in Prozent des Mittelwerts).**

Oben Benzin, unten Diesel. Kodierung x-Achse: (Aktivitätsrate)\_(Fz.kat.)\_(Minderungstechnik)\_(Straßenkategorie)\_(Kraftstoff). Daten siehe Tab. 9.

**Tab. 9 Absolute (in TJ) und relative Unsicherheiten Aktivitätsraten (TJ) Straßenverkehr 2007 (siehe auch Abb. 8.)**

Kraftstoff	Fahrzeugkat.	Strassenkat.	Abgaskonzept	U(AR) absolut	U(AR) relativ	
Benzin	MPD	AB	KO	418	35%	
		IO	KO	1'867	62%	
	MR	AB	KO	364	35%	
		AO	KO	1'484	35%	
		IO	KO	1'221	62%	
		AB	MT	223	28%	
		AO	MT	731	22%	
		IO	MT	653	39%	
	LNF	AB	KO	275	35%	
		AO	KO	188	35%	
		IO	KO	844	62%	
		AB	MT	473	27%	
		AO	MT	249	22%	
	PKW	IO	MT	1'209	39%	
		AB	KO	1'673	35%	
		AO	KO	2'319	35%	
		IO	KO	5'483	62%	
		AB	MT	73'629	28%	
		AO	MT	57'616	22%	
		IO	MT	123'596	39%	
Diesel		BUS	AB	KO	1032	49%
			AO	KO	1'586	50%
			IO	KO	1'279	58%
	AB		MT	2'295	31%	
	AO		MT	3'445	27%	
	IO		MT	4'600	41%	
LNF	AB	KO	1'677	49%		
	AO	KO	1'038	50%		
	IO	KO	2'841	59%		
	AB	MT	10'206	31%		
	AO	MT	5'221	27%		
	IO	MT	17'383	41%		
PKW	AB	KO	3'845	50%		
	AO	KO	4'995	50%		
	IO	KO	6'646	59%		
	AB	MT	42'606	31%		
	AO	MT	33'173	27%		
	IO	MT	57'534	42%		
SNF	AB	KO	1'088	18%		
	AO	KO	1'540	20%		
	IO	KO	3'081	36%		
	AB	MT	51'445	17%		
	AO	MT	20'199	19%		
	IO	MT	25'427	36%		
Verdampfung Benzin	MPD	-	KO	20'475	62%	
	MR	-	KO	23'146	39%	
		-	MT	62'278	62%	
	LNF	-	KO	40'697	62%	
		-	MT	24'920	39%	
	PKW	-	KO	114'909	62%	
		-	MT	2'656'340	39%	

## 5.2.2 Fehlerfortpflanzung von Ebene 5 auf die Ebenen 2-4

### a) Unsicherheit des Verbrauchs

Von den Unsicherheiten auf Ebene 5 gelangt man mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung auf die Ebenen 4, 3 und 2. Die Umsetzung erfolgt mit einer Monte Carlo Simulation.

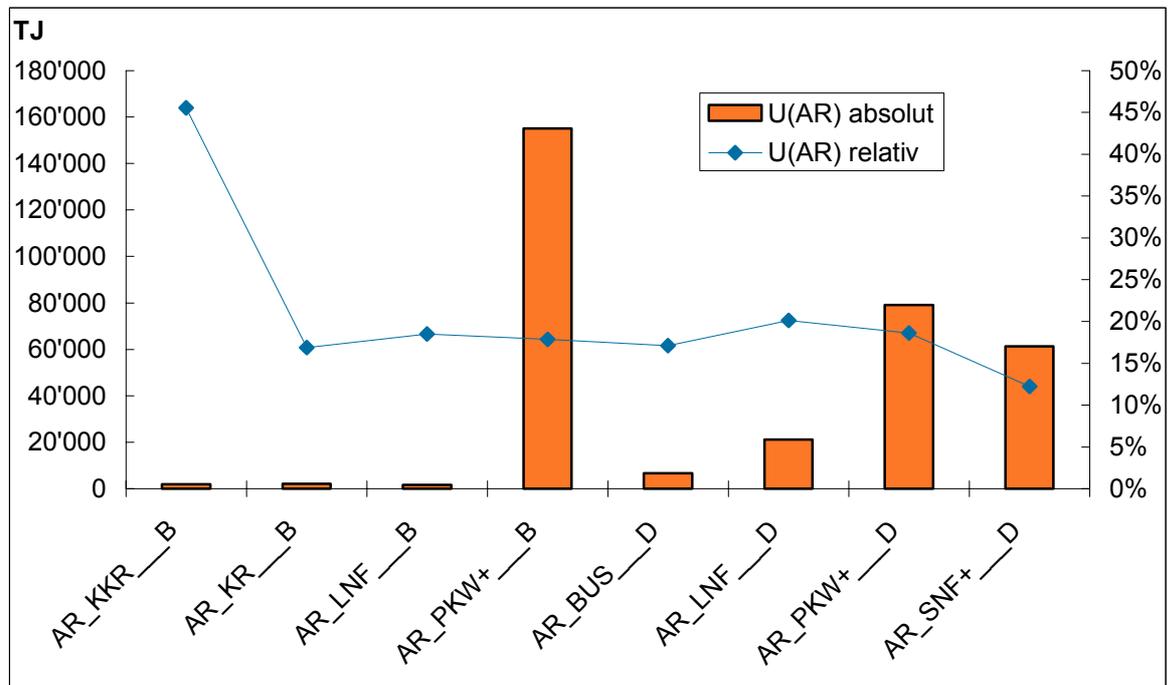
In TREMOD werden die Aktivitätsraten aus Verbrauchsfaktoren  $m_{Kr}$  und Fahrleistungen  $FL$  berechnet, für den Übergang von Ebene 5, d.h. je Straßenkategorie  $SK = AB, AO, IO$  auf Ebene 4 mit folgender Vorschrift

$$V_4 = \sum_{SK} m_{SK} \cdot FL_{SK} = m_{AB} \cdot FL_{AB} + m_{AO} \cdot FL_{AO} + m_{IO} \cdot FL_{IO}$$

Eine solche Gleichung existiert für jede Fahrzeugkategorie, für die beiden Techniken (ohne/mit Minderungstechnik) und für beide Kraftstoffe Benzin und Diesel. Für die Monte Carlo Simulation werden die Unsicherheiten aller Größen auf der rechten Seite der Gleichung  $U(m_{AB}), U(FL_{AB})$  etc. als Input vorgegeben, in der Simulation wird die Unsicherheit der linken Seite der Gleichung ( $V_4$ ) bestimmt.

Mit analogem Vorgehen gelangt man von Ebene 4 auch auf die höheren Ebenen 3 und 2. Dabei werden keine Korrelationen berücksichtigt.

Resultat für die Unsicherheiten der einzelnen Fahrzeugkategorien und getrennt nach Kraftstoff (Ebene 2).



**Abb. 9** Unsicherheiten Aktivitätsraten für die Fahrzeugkategorien, d.h. auf Ebene 3 (Fahrzeugkategorien). Säulen: absolute Werte in TJ, Punkte: relative Werte in Prozent des Mittelwerts.

**Tab. 10 Aktivitätsraten Straßenverkehr 2007 und Unsicherheiten (siehe auch Abb. 9).**

Energie	Fahrzeugkat.	Aktivitätsrate	Unsicherheit (U95%)		Ebene
		TJ	TJ		
Benzin	KKR	4'218	1'921	45.5%	3
	KR	13'077	2'204	16.9%	3
	LNF	8'660	1'600	18.5%	3
	PKW	868'780	155'130	17.9%	3
	Benzin alle	894'734	155'174	17.3%	2
Diesel	BUS	38'827	6'639	17.1%	3
	LNF	105'239	21'171	20.1%	3
	PKW	424'695	79'066	18.6%	3
	SNF	502'121	61'377	12.2%	3
	Diesel alle	1'070'882	102'794	9.6%	2
Summe	alle	1'965'616	186'133	9.5%	2

Die absoluten Unsicherheiten der Fahrzeugkategorien sind selbstverständlich größer als die Unsicherheiten auf den einzelnen Straßenkategorien (Abb. 7). Hingegen sind die relativen Unsicherheiten auf der Ebene 3 geringer als auf Ebene 5 (Abb. 8).

**Wichtigstes Ergebnis ist, dass die Unsicherheit beim Kraftstoffverbrauch bei PKW, LNF und Bussen 17 bis 20 % beträgt, bei den SNF jedoch mit 12 % etwas geringer ist. Dabei sind die Unsicherheiten der Verbrauchsfaktoren, der Fahrleistungen und der Anpassungsfaktoren berücksichtigt.**

### 5.3 Unsicherheiten Aktivitätsraten übrige Verbraucher

Für die Sektoren 1.A.3.c Railway und 1.A.3.d Navigation werden im ZSE die Endenergieverbräuche der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen bzw. die Absatzzahlen des BAFA angesetzt. Für den Sektor 1.A.3.e wird die Aktivitätsrate vom Umweltbundesamt aus dem Gesamtwert des Sektors „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen u. übrige Verbraucher“ (Energiebilanzzeile 67) mit Hilfe eines konstanten Faktors herausgerechnet. Die Unsicherheiten sind für die Aktivitätsraten auf Ebene 2 anzugeben, d.h. eine weitergehende Analyse der Unsicherheiten auf den tieferen Ebenen ist, anders als beim Straßenverkehr, nicht notwendig.

#### Eisenbahn

Der Dieselmotorkraftstoffverbrauch des Eisenbahnverkehrs setzt sich zusammen aus den Verbrauchsangaben der DB AG und der übrigen Bahnen, deren Verbrauch vom Verband öffentlicher Verkehrsunternehmen (VDV) erfasst wird. Mit TREMOD erfolgt über die Bottom-Up-Berechnung zusätzlich eine Berechnung des gesamt Energieverbrauchs der Bahnen, die zur Überprüfung der Absatzzahlen (bzw. umgekehrt) herangezogen werden kann.

Die Absatzzahlen, die dem MWV vorliegen (MWV 2009b), unterscheiden sich teilweise von den Werten, die IFEU von der DB AG bzw. vom VDV zur Verfügung gestellt wurden. Allerdings liegen die Unterschiede in einer geringen Bandbreite. Die Angaben, die für

mehrere Bezugsjahre vorliegen, erlauben eine einfache Fehlerrechnung, die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführt wird:

- Vom MWV liegen Verbrauchswerte für die DB AG und den VDV für die Jahre 1998-2007 vor (MWV 2009b). TREMOD liefert entsprechende Werte, wobei die Verbrauchszahlen der DB AG direkt vom Bahn-Umwelt-Zentrum angegeben werden, während die VDV-Werte mit TREMOD Bottom-Up berechnet wurden.
- Für jedes Bezugsjahr wird nun, jeweils für DB und VDV getrennt, der Standardfehler aus den jeweils zwei unterschiedlichen Werten von MWV und TREMOD berechnet. Anschließend wird der Gesamtfehler des Bahnverkehrs berechnet:

$$s_{g,i} = \sqrt{s_{DB,i}^2 + s_{VDV,i}^2} \quad \text{s: Standardfehler, g: gesamt, i: Bezugsjahr}$$

Der gesamte mittlere Fehler für die Jahre 1998-2007 wird dann wie folgt berechnet:

$$s_g = \sqrt{(s_{g,1998}^2 + \dots + s_{g,2007}^2) / 10}$$

$$s_{g,rel} = \frac{s_g}{MW_{AR}} \quad MW_{AR}: \text{Mittelwert der Kraftstoffabsätze}$$

Für den Verbrauch der DB AG ergibt sich als relativer mittlerer Fehler über die betrachteten zehn Jahre ein Wert von 3,3 %, für die übrigen (VDV)-Bahnen von 16 %. Der Gesamtfehler liegt dann bei 3,8 %, die Unsicherheit bei 7,6 %.

### Binnenschifffahrt

Die Absatzzahlen, die der Binnenschifffahrt in der Energiebilanz zugeordnet werden, sind im Zeitverlauf sehr stark zurückgegangen (-75 % zwischen 1994 und 2007). Diese Entwicklung korreliert in keinster Weise mit den Transportleistungen, die im gleichen Zeitraum leicht zugenommen haben (+5 %). Es ist daher unbestritten, dass die Absatzzahlen deutlich unter dem tatsächlichen Verbrauch der Binnenschifffahrt liegen. Hierzu gibt es zwei Hauptgründe:

- Die Binnenschifffahrt tankt vermehrt im Ausland. Dadurch wird der Verbrauch in den Bilanzen anderer Länder erfasst. Diese Differenz ist allerdings nicht Gegenstand der Fehlerrechnung, da im ZSE die Absatzbilanz die Grundlage bildet und nicht der durch Aktivitäten im Inland verbrauchte Kraftstoff. Analog zum Straßenverkehr wird daher der Korrekturfaktor zwischen dem mit TREMOD berechneten Inlandsverbrauch und der Energiebilanz nur mit einer geringen Unsicherheit angenommen.
- Der Verbrauch der Binnenschifffahrt wird in der Energiestatistik in anderen Sektoren erfasst. Vom MWV wird z.B. vermutet, dass eine Mitgliedsfirma im Jahr 2007 die Statistik umgestellt hat und dadurch ein Teil des Verbrauchs als Heizöl anderen Sektoren zugeordnet wird (MWV 2008). Dieser Umstand betrifft die inländische Energiebilanz und erhöht daher die Unsicherheit der dokumentierten Absatzzahl.

Beide Ursachen konnten bisher nicht quantifiziert werden. Wenn man vereinfacht annimmt, dass der Rückgang des Energieverbrauchs von 2006 (11.188 TJ) bis 2007 (6.868 TJ) auf die Änderung der Statistik zurückzuführen ist und somit ein Hinweis auf den möglichen Fehler ist, berechnet man eine Unsicherheit von 47 %, die hier zugrunde gelegt wird.

## Bauwirtschaftlicher Verkehr

Wie bereits in Kapitel 2.6.4 ausgeführt, liegen uns drei verschiedene Ansätze zur Bestimmung des Energieverbrauchs der Bauwirtschaft vor. Eine Fehlereichung mit den drei Ergebnissen von IFEU, MWV und UBA für 2007 ergibt eine Unsicherheit von 62 % für Dieselmotorkraftstoff und 18 % für Ottomotorkraftstoff. Diese Werte werden hier zugrunde gelegt.

## Ergebnisse übrige Verbraucher

Die folgende Tabelle fasst die für die zugrunde gelegten Aktivitätsraten und daraus berechneten Unsicherheiten von Bahn, Schiff und Bauwirtschaft zusammen.

**Tab. 11 Unsicherheiten der Aktivitätsraten für den übrigen Verkehr im Jahr 2007**

	Aktivitätsraten (TJ)			Mittelwert	Standardfehler	Rel. Fehler	Unsicherh. U
	ZSE	MWV	TREMOD				
Bauwirtschaft. Diesel	33.839	17.731	55.741	35.770	11.015	31%	62%
Bauwirtschaft. Otto	3623		4342	3.983	360	9%	18%
Binnenschifffahrt		6.826	11.000	8.913	2.087	23%	47%
Eisenbahn		16,424	18,093	17.259	834	4.8%	9,7%
Eisenbahn, Mittel 1998-2007		22.000	21.000	21.500	820	3,8%	7,6%

**Quellen:** ZSE: Stand April 2009; MWV: (MWV 2009a); Binnenschifffahrt in Übereinstimmung mit BAFA, Dezember 2008  
 TREMOD: Bauwirtschaft : (IFEU 2009a), Binnenschifffahrt: Schätzung (Annahme: Rückgang von 2006 bis 2007 ist durch andere Zuordnung in der Statistik (Gasöl) verursacht (noch zu klären);  
 Eisenbahn: (DB 2009) und vorläufige TREMOD-Berechnung (IFEU 2009b)  
 Eisenbahn Mittel 1998-2007: MWV: (MWV 2009b); TREMOD: (DB 2009) und vorläufige TREMOD-Berechnung (IFEU 2009b)

## 6 Bestimmung von Unsicherheiten für Emissionsfaktoren und Emissionen

### 6.1 Vorgehen

#### a) Straßenverkehr

- Die Emissionen werden in TREMOD als Produkt aus Emissionsfaktoren und Fahrleistungen berechnet. Die nötigen Daten sind in TREMOD vorhanden, allerdings sind dort keine Informationen zu den Unsicherheiten angegeben – weder zu Emissionsfaktoren, Fahrleistungen (wie oben schon erwähnt) noch zu den Emissionen selber – diese wurden bisher nicht untersucht.
- Im ZSE werden die Emissionen rechnerisch anders dargestellt, nämlich als Produkt aus Emissionsfaktoren in der Einheit [Emission pro Kraftstoffverbrauch] ([kg/TJ]) und Aktivitätsraten in der Einheit [Kraftstoffverbrauch] ([TJ]). Faktisch ist es aber so, dass die Emissionen und der Kraftstoffverbrauch aus TREMOD mit integriertem Anpassungsfaktor beim Verbrauch die echten Basisgrößen für das ZSE bilden; die Emissionsfaktoren im ZSE sind lediglich das Ergebnis einer nachgeschalteten Division der Emissionen durch die Verbräuche.
- Im vorliegenden Projekt werden die Unsicherheiten der Emissionen mit einer Fehlerrechnung aus den Unsicherheiten der Emissionsfaktoren und des Verbrauchs berechnet.
- Als Input dienen die Unsicherheiten für  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$ , NMVOC der PKW- und SNF-Emissionsfaktoren (siehe Kapitel 4.2). Sie stützen sich auf die Messdaten des Projekts zur Aktualisierung der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (INFRAS 2009a, Rexeis 2009). Input für die Unsicherheiten des PKW-Verbrauchs sind die Resultate aus Kap. 5.2, welche ebenfalls auf den genannten Messdaten beruhen. Es handelt sich dabei um Emissionsfaktoren in der Einheit [Emission pro Fahrzeug-km], während die Emissionsfaktoren im ZSE in der Einheit [Emission pro TJ] dargestellt sind. Es wird deshalb die Annahme unterstellt, dass die relativen Unsicherheiten der Emissionsfaktoren in beiden Darstellungsformen gleich sind<sup>7</sup>.
- Die Unsicherheiten für  $\text{CO}_2$  werden auf eigene Weise berechnet. Es liegen Messdaten zur Kraftstoffqualität vor, unter anderem auch zum Kohlenstoffgehalt der Kraftstoffe (Öko-Institut 2007). Daraus wurden  $\text{CO}_2$ -Emissionsfaktoren abgeleitet. Im Projekt wurden auch die statistischen Streuungen der verschiedenen Messproben dokumentiert. Daraus konnten für das vorliegende Projekt die Unsicherheiten der  $\text{CO}_2$ -Emissionsfaktoren für Benzin (0,40 %) und Diesel (0,33 %) berechnet werden.
- $\text{N}_2\text{O}$  wird ebenfalls separat bestimmt. Belastbare Messdaten sind für die hier benötigte Stufe nicht vorhanden. Es wird deshalb auf Schätzungen des Handbuchs Emissionsfaktoren, Version 2.1 zurückgegriffen und je ein Wert für leichte Motorwagen/Benzin, für leichte Motorwagen/Diesel und für schwere Motorwagen/Diesel bestimmt.

---

<sup>7</sup> Die Umrechnung auf Energieeinheiten erfolgt mit dem Heizwert. Dessen Unsicherheit ist sehr gering im Vergleich mit den Unsicherheiten der Emissionsfaktoren und Fahrleistungen. Die Unsicherheit der Fahrleistungen ist in der vorliegenden Studie im Verbrauch enthalten (Verbrauchsfaktor\*Fahrleistung)

- Wie im Kapitel 4.2 erwähnt, sind keine statistisch genügend abgestützten Messdaten für die übrigen Fahrzeugkategorien vorhanden. Man kann aber davon ausgehen, dass sowohl die Messunsicherheiten wie auch die Streuungen der Emissionsfaktoren zwischen den Fahrzeugen bei den leichten Motorwagen ähnlich wie bei den PKW sind respektive bei den Bussen ähnlich wie bei den SNF.
- Die Fehlerrechnungen von Ebene 5 auf Ebene 2 werden wiederum mit einer **Monte Carlo Simulation** umgesetzt.
  - **Häufigkeitsverteilungen** der Unsicherheiten:
    - Normalverteilungen für die Unsicherheiten der Verbrauchsfaktoren und Fahrleistungen.
    - Normalverteilungen für Emissionsfaktoren  $\text{NO}_x$  und  $\text{CO}_2$ .
    - Lognormalverteilungen für Emissionsfaktoren  $\text{CH}_4$ , NMVOC leichte Motorwagen ohne Minderungstechnik (PKW, LNF, MR).
    - Normalverteilungen für  $\text{CH}_4$ , NMVOC für alle SNF, alle Busse und für leichte Motorwagen mit Minderungstechnik.
    - Lognormalverteilungen für Emissionsfaktoren  $\text{N}_2\text{O}$ .
  - **Korrelationen**: Monte Carlo Simulationen mit verschiedenen Korrelationen haben gezeigt, dass ihr Einfluss auf die Resultate nur sehr gering ist. Deshalb wurde auf Korrelationen generell verzichtet mit Ausnahme von  $\text{CO}_2$ , für das nur je eine Unsicherheit für Benzin ( $72,00 \pm 0,30 \text{ t/TJ}$ ,  $U_{\text{rel}} = 0,40 \%$ ) und für Diesel ( $74,00 \pm 0,25 \text{ t/TJ}$ ,  $U_{\text{rel}} = 0,33 \%$ ) benutzt wird. Das heißt, dass bei allen Fahrzeugkategorien und allen Strukturelementen (d.h. auf allen Ebenen 5 bis 2) immer dieselbe Unsicherheit auftritt. Das ist gleichbedeutend mit der Aussage, dass die Unsicherheiten der  $\text{CO}_2$ -Emissionsfaktoren Benzin resp. Diesel voll korreliert sind (Korrelationskoeffizient = +1).

Das Schema zur Illustration des Berechnungsablaufs in Abb. 5 enthält neben dem Verbrauch auch die Emissionen und die Emissionsfaktoren und gilt damit auch für das oben skizzierte Vorgehen.

## b) Übrige Verbraucher

Die Emissionsfaktoren der übrigen Sektoren sind im ZSE als Gesamtwerte auf Ebene 2 enthalten. Sie werden berechnet aus den Gesamtemissionen des Sektors dividiert durch den Gesamtverbrauch. Wegen fehlender Informationen, des deutlich geringeren Beitrags dieser Sektoren zu den klimarelevanten Emissionen und aufgrund des beschränkten Zeitrahmens in diesem Projekt ist eine detaillierte Fehlerrechnung wie beim Straßenverkehr nicht möglich und auch nicht notwendig. Wir wählen daher folgendes Vorgehen:

Exemplarisch für den Schienenverkehr wird eine vereinfachte Berechnung der Unsicherheiten der Emissionsfaktoren unter Berücksichtigung von Messfehlern und Fehlern, die aus der Unkenntnis des realen Betriebsverhaltens resultieren, durchgeführt.

Schiffe und Baumaschinen werden ebenfalls von Dieselmotoren angetrieben. Emissionsfaktoren werden nach ähnlichen Verfahren ermittelt. Es wird daher angenommen, dass sich die Unsicherheiten bei diesen Sektoren in ähnlichen Größenordnungen bewegen wie bei den Dieselbahnen. Eine eigene Analyse der Emissionsfaktoren für den Bereich der

Baumaschinen ist im Rahmen dieser Untersuchung aufgrund des hohen Aufwands nicht möglich. Falls eine solche Detailanalyse durchgeführt wird, müsste die gleiche Methodik auch für den Sektor Landwirtschaft angewandt werden, da die Datenbasis für die Emissionsfaktoren gleich ist.

Gemessene Emissionsfaktoren für den Nicht-Straßenverkehr liegen üblicherweise für die limitierten Schadstoffkomponenten (NO<sub>x</sub>, CO, VOC, PM) und den Kraftstoffverbrauch vor. Für die Klimagase N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> liegen keine oder nur sehr pauschale Emissionsfaktoren für große Dieselmotoren vor, N<sub>2</sub>O wird üblicherweise aus dem Emissionsfaktor für konventionelle schwere Nutzfahrzeuge abgeleitet (z.B. IFEU 2005, EMEP 2009b), CH<sub>4</sub> wird für große Dieselmotoren mit einem pauschalen Anteilswert berechnet (z.B. in IFEU 2005: 2,4 % an HC).

Wir schlagen daher vor, für CH<sub>4</sub> wie für NMVOC die gleichen Unsicherheiten anzusetzen wie für VOC. Bei N<sub>2</sub>O sollte vorerst auf die Angabe von Unsicherheiten verzichtet werden (wie auch in EMEP 2009a).

## 6.2 Unsicherheiten Emissionsfaktoren und Emissionen Straßenverkehr

### 6.2.1 Inputdaten und Unsicherheiten Emissionsfaktoren Ebene 5

#### a) PKW Emissionsfaktoren Auspuff

Basis für die PKW bilden die Messwerte aus den Messdatenbanken INFRAS (2009a), siehe dazu Kap. 5.2.1 a). Als Unsicherheit wird wie im Fall der Verbrauchsfaktoren der doppelte Standardfehler des Mittelwerts benutzt. Dabei wird die **relative** Unsicherheit, wie sie aus den Messdaten berechnet wird, auf die Emissionsfaktoren des ZSE übertragen unter der Annahme, dass die relative Unsicherheit für die Emissionsfaktoren sowohl in Fahrleistungs- (TREMODO) als auch in Energieeinheiten (ZSE) gleich ist.

Am Anfang der Berechnung stehen die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren je Fahrzyklus und je Euro-Klasse aus der Datenbank INFRAS (2009a). Diese werden wie im Kap. 4.2.1 beschrieben in zwei Schritten gemittelt: Schritt 1 „Mittelwert über Zyklen“, Schritt 2 „Mittelwert über Euro-Klassen“ (fahrleistungsgewichtet). Als Ergebnis stehen die Unsicherheiten auf Ebene 5 zur Verfügung (siehe Tab. 12).

Ein Vergleich der Ergebnisse in Tab. 12 unter den Fahrzeugen mit Minderungstechnik (MT) zeigt, dass die relativen Unsicherheiten bei den Diesel-PKW deutlich geringer sind als bei den Benzin-PKW (siehe dazu Kap. 7.2).

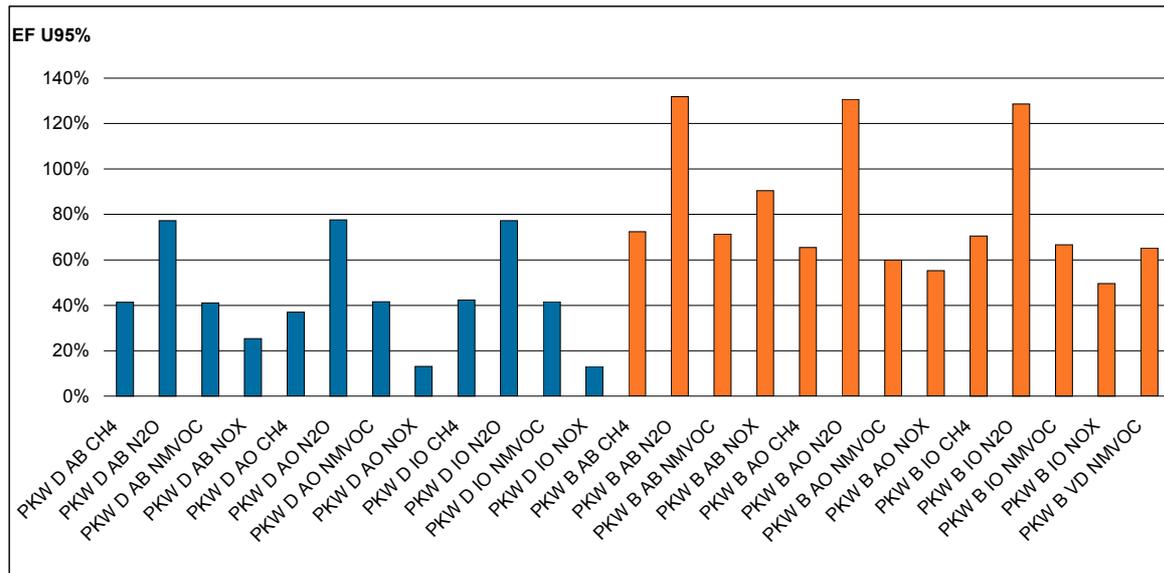
Man beachte, dass in Tab. 12 und allen folgenden Tabellen und Abbildungen im Kap. 6.2 mit Ausnahme von NO<sub>x</sub> und CO<sub>2</sub> Lognormalverteilungen benutzt wurden und die Fehlerintervalle demnach asymmetrisch sind. Alle betroffenen Unsicherheiten werden mit einer einzigen Zahl charakterisiert entsprechend der Formel von Seite 17

$$U_{95\%} = 0.5 \cdot \left( m^* \cdot (s^*)^2 - m^* / (s^*)^2 \right)$$

Tab. 12: Unsicherheit Emissionsfaktoren PKW Ebene 5

Kraftstoff	Technik	Strassenkat	Schadstoff	Em.faktor kg/TJ	U95%
D	KO	AB	CH4	0.38	31%
D	KO	AB	N2O	0.00	77%
D	KO	AB	NM VOC	15.6	32%
D	KO	AB	NOX	236	28%
D	KO	AO	CH4	0.56	36%
D	KO	AO	N2O	0.00	77%
D	KO	AO	NM VOC	22.8	36%
D	KO	AO	NOX	230	28%
D	KO	IO	CH4	1.27	36%
D	KO	IO	N2O	0.00	78%
D	KO	IO	NM VOC	51.6	26%
D	KO	IO	NOX	217	35%
D	MT	AB	CH4	0.27	41%
D	MT	AB	N2O	1.65	77%
D	MT	AB	NM VOC	11.2	41%
D	MT	AB	NOX	222	25%
D	MT	AO	CH4	0.30	37%
D	MT	AO	N2O	2.28	78%
D	MT	AO	NM VOC	12.2	42%
D	MT	AO	NOX	205	13%
D	MT	IO	CH4	1.08	42%
D	MT	IO	N2O	3.13	77%
D	MT	IO	NM VOC	43.9	42%
D	MT	IO	NOX	180	13%
B	KO	AB	CH4	9.14	46%
B	KO	AB	N2O	0.00	131%
B	KO	AB	NM VOC	262	46%
B	KO	AB	NOX	757	43%
B	KO	AO	CH4	13.3	87%
B	KO	AO	N2O	0.00	134%
B	KO	AO	NM VOC	381	86%
B	KO	AO	NOX	750	49%
B	KO	IO	CH4	50.2	82%
B	KO	IO	N2O	0.00	128%
B	KO	IO	NM VOC	689	81%
B	KO	IO	NOX	345	48%
B	KO	VD	NM VOC	28.4	82%
B	MT	AB	CH4	3.53	72%
B	MT	AB	N2O	0.73	132%
B	MT	AB	NM VOC	12.2	71%
B	MT	AB	NOX	81.3	90%
B	MT	AO	CH4	2.94	65%
B	MT	AO	N2O	1.94	131%
B	MT	AO	NM VOC	10.2	60%
B	MT	AO	NOX	64.3	55%
B	MT	IO	CH4	5.80	70%
B	MT	IO	N2O	2.62	129%
B	MT	IO	NM VOC	96.6	67%
B	MT	IO	NOX	72.9	50%
B	MT	VD	NM VOC	1.06	65%

Die folgende Abbildung illustriert die Unsicherheiten für PKW mit Minderungstechnik.



**Abb. 10 Unsicherheiten Emissionsfaktoren PKW mit Minderungstechnik je Straßenkategorie und Schadstoffe (Ebene 5). Blau: Diesel. Orange: Benzin. Quelle: (INFRAS 2009a)**

### b) PKW Emissionsfaktoren Verdampfung

Messdaten zu den Unsicherheiten der NMVOC-Emissionsfaktoren aus der Verdampfung sind keine vorhanden. In der vorliegenden Analyse wird angenommen, dass dieselben (relativen) Unsicherheiten für Auspuff-Emissionsfaktoren wie für Verdampfungs-Emissionsfaktoren gelten. Folgende Tabelle zeigt die Unsicherheiten für Aktivitätsraten, Emissionsfaktoren und Emissionen für die Ebenen 3 und 2.

**Tab. 13 Übersicht über die Unsicherheiten bei der Verdampfung (NMVOC)**

Parameter	Einheit	Wert 2007	Unsicherheit		Ebene
			absolut	relativ	
<i>Aktivitätsraten</i>					
LNF	1000 t Benzin	92	16	17%	3
KKR	1000 t Benzin	101	32	32%	3
KR	1000 t Benzin	129	24	19%	3
PKW	1000 t Benzin	6'986	1'349	19%	3
Total	1000 t Benzin	7'309	1'351	18%	2
<i>Emissionsfaktoren</i>					
LNF	kg/t	5.7	2.4	82%	3
KKR	kg/t	14	26	377%	3
KR	kg/t	28	10	73%	3
PKW	kg/t	1.8	0.7	76%	3
Mittel	kg/t	2.5	0.8	62%	2
<i>Emissionen</i>					
LNF	t NMVOC	530	375	71%	3
KKR	t NMVOC	1'379	1'066	77%	3
KR	t NMVOC	3'605	1'967	55%	3
PKW	t NMVOC	12'420	6'896	56%	3
Total	t NMVOC	17'934	26'457	29%	2

### c) SNF Emissionsfaktoren Auspuff

Basis für die SNF sind die Werte, die von der TU Graz zur Verfügung gestellt wurden (Rexeis 2009).

**Tab. 14 SNF: Unsicherheit Verbrauchs- und Emissionsfaktoren (Rexeis 2009). Die Fahrleistungsgewichtung für die preEuro-Klassen („konventionell“) stammt aus TREMOD. FC: Fuel consumption, HC = VOC.**

emission concept	emission component	average emission level (g/kWh)	range of uncertainty for emission factors (U95%)			remarks
			model & measurement repeatability	tested sample	total	
Euro III	FC	216	3.3%	1.6%	3.6%	different model approach compared to Euro IV ff
	NOx	5.58	6.2%	2.6%	6.8%	
	HC	0.20	25%	17%	31%	
Euro IV - SCR	NOx	4.45	24%	26%	36%	---
Euro V - SCR	NOx	3.25	22%	30%	37%	---
Euro IV & V - SCR	FC	223	4%	2%	4%	---
	HC	0.02	47%	21%	51%	very low absolute emission levels

### Erläuterungen zur Tabelle

Für die Bestimmung der Unsicherheiten liegt je Emissionsklasse und je Schadstoff eine Emissionsfunktion über einem Motorenkennfeld vor – erstellt aus zahlreichen Emissionsmessungen. Aus den Kennfeldern wird über ein "durchschnittliches Motorlastkollektiv" für jedes Kennfeld ein gewichteter Emissionswert berechnet. Damit entsteht ein für N Fahrzeuge vergleichbarer Emissionswert. Aus der Streuung der Emissionswerte für verschiedene Motoren können Standardabweichung und Standardfehler berechnet werden. Der Standardfehler multipliziert mit 2 ergibt die Unsicherheit (U95 %) in der Spalte „tested sample“.

Aus der Emissionsfunktion und dem durchschnittlichen Motorlastkollektiv können nicht alle relevanten Fahrweisen abgebildet werden (z.B. stop+go). Mithilfe einer Modellrechnung können solche fehlenden Teile ergänzt und anhand eines Vergleichs von Modell- mit Messwerten optimiert werden. Daraus lässt sich eine weitere Unsicherheit berechnen, die in der Tabelle in der Spalte „Model & measurement repeatability“ eingetragen ist. Die beiden Unsicherheiten zusammen<sup>8</sup> ergeben in der Spalte „Total“ die Unsicherheit (U95 %), die in der vorliegenden Analyse als Unsicherheit für die Emissionsfaktoren verwendet wird.

Das hinterlegte „durchschnittliche Motorlastkollektiv“ entspricht keiner spezifischen Straßenkategorie, sondern einem mittleren Fahrverhalten. Deshalb muss in der vorliegenden Analyse auf eine Differenzierung nach Straßenkategorien verzichtet werden.

### d) Spezialfall CO<sub>2</sub>

$$^8 U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$$

Gemäß dem Treibhausgasinventar Deutschlands (FEA 2009) werden für Benzin und Diesel die CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren 72 bzw. 74 t CO<sub>2</sub>/TJ verwendet. Die Unsicherheit dieser Emissionsfaktoren basieren auf Angaben zum C-Gehalt der verschiedenen Treibstofftypen (Normal bleifrei, Super bleifrei, Super Plus bleifrei und Diesel; Winter-/Sommerqualitäten). In diesen Treibstoffen variiert der C-Gehalt typischerweise um 0,3 % bis 0,9 %. Die Unsicherheiten je Treibstofftypen wurden gemäß deren Anteil an der jährlich verkauften Menge gewichtet. Dies ergibt eine Unsicherheit des Emissionsfaktors von 0,40 % für Benzin und 0,33 % für Diesel (Öko-Institut 2007). Diese beiden Werte werden in der Simulation für alle Fahrzeugtypen unabhängig von der Technologie und von der Straßenkategorie eingesetzt. Beim CO<sub>2</sub> gelten demnach dieselben Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für die Ebene 2-5.

**Tab. 15 Unsicherheiten der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren. Anteil Ottokraftstoff: Verbrauchsanteile 2007 der drei wichtigsten Kraftstoffqualitäten (Summe 100 %). Anteil Diesel: Die Messwerte 1970-1992 werden mit 100 %, die Werte Sommer/Winter 2000/2001 mit je 50 % für die Mittelung gewichtet.**

Kraftstoffe	Messkamp.	Anteil	Min. (2.5%)	Max (97.5%)	U95%
<b>Ottokraftstoffe</b>		Verbr. 2007			
Normal bleifrei	DGKM 1993	26%	86.9%	87.8%	0.45%
Super bleifrei	DGKM 1993	71%	88.1%	88.7%	0.30%
Super Plus bleifrei	DGKM 1993	3%	86.9%	88.4%	0.75%
<b>gewichtetes Mittel Ottokraftstoffe</b>					<b>0.40%</b>
<b>Diesekraftstoffe</b>		Gewichtung			
Werte 1970-1992	DGKM 1993	100%	99.5%	100.3%	0.41%
Werte Sommer 2000/2001	DGKM 2002	50%	99.9%	100.3%	0.23%
Werte Winter 2000/2001	DGKM 2002	50%	99.8%	100.3%	0.29%
<b>gewichtetes Mittel Diesekraftstoffe</b>					<b>0.33%</b>

#### e) Spezialfall N<sub>2</sub>O

Zurzeit fehlen belastbare Messdaten zur Unsicherheit von N<sub>2</sub>O. Es wird deshalb auf Expertenschätzungen für das Handbuch Emissionsfaktoren Version 2.1 und auf die wenigen vorhandenen Angaben bei Copert 4 zurückgegriffen. Dort waren folgende Emissionsfaktoren aus wenigen Messdaten abgeleitet worden (und sind im HBEFA 2.1 implementiert).

**Tab. 16 N<sub>2</sub>O Emissionsfaktoren aus dem Handbuch Emissionsfaktoren (2.1) und aus Copert 4 für leichte und schwere Motorwagen (LMW, SMW).**

Fahrzeugschicht	Quelle	Strassenkategorie			V.K.
		Emissionsfaktoren N <sub>2</sub> O mg/km			
		io	ao	AB	
LMW Benzin Euro0 (GKat)	HBEFA 2.1	21	13	8	47%
LMW Benzin Euro1 (GKat)	HBEFA 2.1	21	13	8	47%
LMW Benzin Euro2 (GKat)	HBEFA 2.1	13	4	2	93%
LMW Benzin Euro3 (GKat)	HBEFA 2.1	5	2	1	78%
LMW Benzin Euro4 (GKat)	HBEFA 2.1	2.5	1	0.5	78%
LMW Benzin Euro2 (GKat)	Copert 4	11.2	4.1	2.2	81%
LMW Benzin Euro3 (GKat)	Copert 4	1.7	0.8	0.7	49%
LMW Benzin Euro4 (GKat)	Copert 4	2.1	0.8	0.7	62%
V.K. mittel					<b>69%</b>
LMW Diesel Euro1	Copert 4 (HBEFA 2.1)	2	4	4	35%
LMW Diesel Euro2	Copert 4 (HBEFA 2.1)	4	6	6	22%
LMW Diesel Euro3	Copert 4 (HBEFA 2.1)	9	4	4	51%
LMW Diesel Euro4	Copert 4 (HBEFA 2.1)	9	4	4	51%
V.K. mittel					<b>41%</b>
SMW Diesel Euro0 / 80erJahre	HBEFA 2.1	16.2	13.6	9.4	26%
SMW Diesel Euro1	HBEFA 2.1	16.2	13.6	9.4	26%
SMW Diesel Euro2	HBEFA 2.1	15.9	13.6	8.8	28%
SMW Diesel Euro3	HBEFA 2.1	8.4	7.8	5.9	18%
SMW Diesel Euro4	HBEFA 2.1	8.4	7.8	5.9	18%
SMW Diesel Euro5	HBEFA 2.1	8.4	7.8	5.9	18%
V.K. mittel					<b>23%</b>

Mangels anderer Daten werden diese Zahlen für eine Schätzung der Unsicherheiten benutzt. Die Variabilität zwischen den Straßenkategorien kann je Fahrzeugschicht mit ihrem Variationskoeffizienten quantifiziert werden (Spalte V.K. in der Tabelle). Werden die V.K. für die drei Gruppen (LMW/Benzin, LMW/Diesel, SMW/Diesel) gemittelt, findet man für LMW/Benzin 69 %. Würde dieser Parameter zur Bestimmung der Unsicherheit mit hinterlegter Normalverteilung verwendet, so müsste er noch mit dem Faktor 2 multipliziert werden (Standardabweichung mal 2 ergibt 95 %-Unsicherheit), damit würde die Unsicherheit 138 %, also größer als 100 %. Das 95 %-Vertrauensintervall enthielte damit auch unrealistische negative Werte. Um dies zu vermeiden, werden in den drei Gruppen Lognormalverteilungen (statt Normalverteilungen) unterstellt. Das Fehlerintervall wird dadurch asymmetrisch und die Monte Carlo Simulation generiert keine negativen Werte.

#### f) Spezialfall VOC (CH<sub>4</sub>, NMVOC) von PKW/konventionell

Die Messunsicherheiten von VOC (HC) sind bei Benzin-PKW relativ groß. Bei den Fahrzeugschichten mit Minderungstechnik (Euro1 bis Euro4) verringern sich die Unsicherheiten bei der Mittelung über die Fahrzeugschichten, sodass die Unsicherheiten auf der Ebene 5 für die Fahrzeuge mit Minderungstechnik unter 100 % bleiben. Für die Fahrzeuge ohne Minderungstechnik entfällt die Mittelung, weil nur die Euro0-Fahrzeuge dazugehören. In diesem Fall tritt eine Unsicherheit größer als 100 % auf, das Fehlerintervall enthält unrealistische, negative Werte. Für diesen Fall muss man davon ausgehen, dass die Normalverteilung, die implizit bei der Berechnung der Unsicherheiten vorausgesetzt wird, nicht den Verhältnissen entspricht. Deshalb wird für diesen Fall eine Lognormalverteilung angenommen. Die Ergebnisse werden anschließend für CH<sub>4</sub> und NMVOC benutzt.

## 6.2.2 Unsicherheiten Aktivitätsraten

Die Unsicherheiten der Aktivitätsraten (absolute und relative Werte) zeigen Tab. 10\_ und Tab. 22.

NMVOC Verdampfung: Die Aktivitätsraten zur Berechnung der NMVOC-Verdampfungsemissionen werden in Tonnen Treibstoffe ausgedrückt. Für diese Aktivitätsraten werden als Unsicherheiten die Unsicherheiten des Treibstoffverbrauchs von Benzinfahrzeugen Innerorts verwendet (siehe Tab. 13).

## 6.2.3 Unsicherheiten Emissionen Ebene 5

Aus den Unsicherheiten der Emissionsfaktoren und Aktivitätsraten werden die Unsicherheiten der Emissionen auf Ebene 5 mit dem Fehlerfortpflanzung berechnet

$$EM_5 = EF_5 \cdot AR_5 \quad \Rightarrow \quad \frac{U_{EM_5}}{EM_5} = \sqrt{\left(\frac{U_{EF_5}}{EF_5}\right)^2 + \left(\frac{U_{AR_5}}{AR_5}\right)^2}$$

Es gibt knapp 200 solche Gleichungen für alle Fahrzeug- und Straßenkategorien, ohne/mit Minderungstechnik, für alle Schadstoffe und die beiden Kraftstoffe B/D.

## 6.2.4 Unsicherheiten Emissionen und Emissionsfaktoren auf den Ebenen 4, 3 und 2

### a) Emissionen

Die Emissionen auf Ebenen 4, 3, 2 erhält man durch Summieren der Emissionen über die tieferen Ebenen

$$EM_2 = \sum EM_5 = \sum_{SK,MT,FK} EM_{SK,MT,FK}, \text{ SK Str.kategorie, MT Minderungstechnik, FK Fzg.kat.}$$

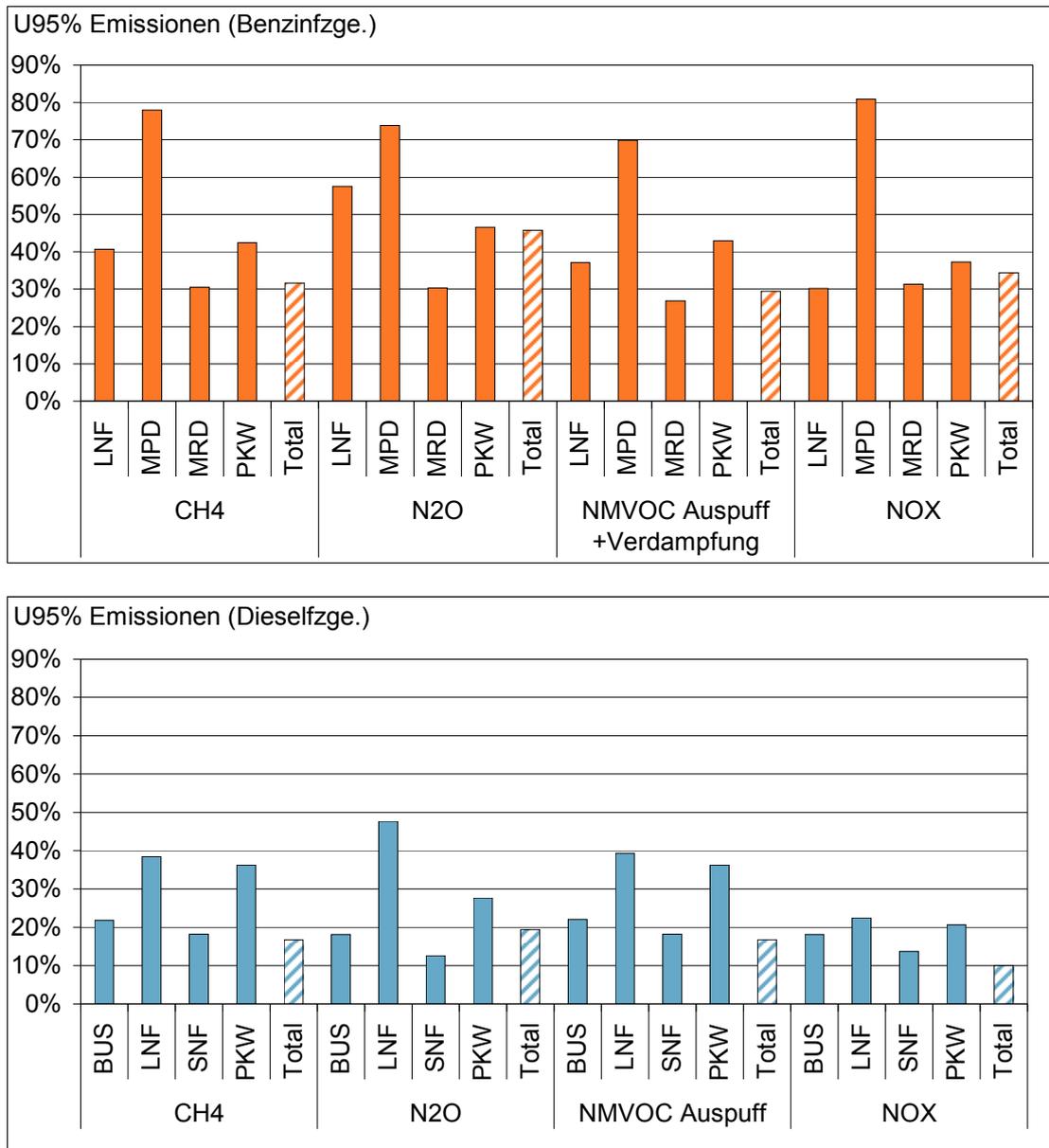
Nach Gausscher Fehlerfortpflanzung bestimmt man daraus die Unsicherheit der Emissionen gemäß

$$U_{EM_2} = \sqrt{\sum_{SK,MT,FK} U_{EM_{SK,MT,FK}}^2}$$

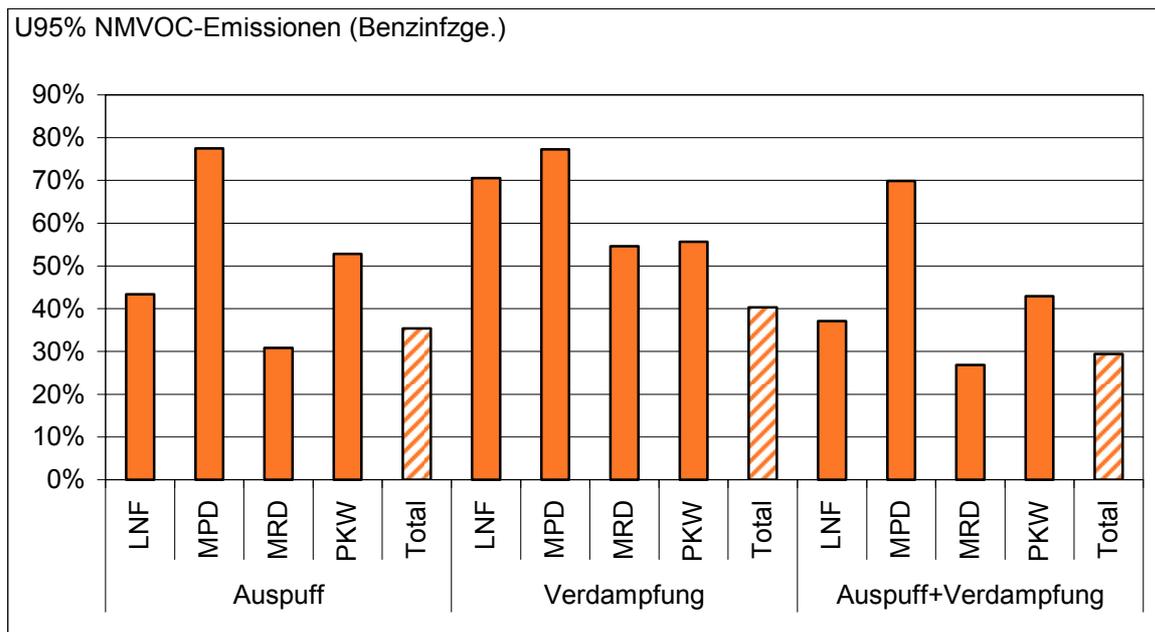
Es gibt 9 solche Gleichungen: Bei den Benzin-Fahrzeugen für CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NMVOC/Auspuff, NMVOC/Verdampfung, NO<sub>x</sub> und bei den Diesel-Fahrzeugen für CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NMVOC/Auspuff, NO<sub>x</sub>.

In der vorliegenden Untersuchung werden die Unsicherheiten wieder mit einer Monte Carlo Simulation bestimmt.

Abb. 11 zeigt die relativen Emissionsunsicherheiten auf Ebenen 3 und 2 für jede Fahrzeugkategorie sowie als Total. Die NMVOC-Emissionen der Benzinfahrzeuge werden in Abb. 12 aufgeschlüsselt nach Auspuff- und Verdampfungsemissionen. Beim Diesel sind die Verdampfungsverluste sehr viel geringer und werden vernachlässigt.



**Abb. 11: Unsicherheit der Auspuff-Emissionen je Fahrzeugkategorie - Ebene 3 (volle Balken) und aggregiert auf Stufe Straßenverkehr - Ebene 2 (schraffierte Balken).**



**Abb. 12: Unsicherheit der NMVOC-Emissionen je Fahrzeugkategorie - Ebene 3 (volle Balken) und aggregiert auf Stufe Straßenverkehr - Ebene 2 (schraffierte Balken) und differenziert nach Auspuff und Verdampfung sowie die Summe.**

### b) Emissionsfaktoren

Aus den Unsicherheiten der Emissionen und der Verbrauchszahlen auf Ebene 4, 3, 2 lassen sich die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren auf denselben Ebenen berechnen. Für die Emissionsfaktoren gilt die Gleichung

$$EF_2 = \frac{EM_2}{V_2}, \quad V \text{ in Energieeinheiten (TJ)}$$

woraus mit Gauß'scher Fehlerfortpflanzung die Unsicherheit nach

$$\frac{U_{EF_2}}{EF_2} = \sqrt{\left(\frac{U_{EM_2}}{EM_2}\right)^2 + \left(\frac{U_{V_2}}{V_2}\right)^2}$$

berechnet würde. Für die vorliegende Untersuchung wird dieser Rechenschritt aber wieder in einer Monte Carlo Simulation ausgeführt.

Die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren auf Ebene 2 sind schließlich jene Zahlen, die in der Unsicherheitsanalyse des Treibhausgasinventars aufgeführt werden müssen, zusammen mit den Unsicherheiten der Aktivitätsraten Benzin/Diesel.

**Tab. 17 Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für alle Fahrzeugkategorien (Ebene 3) und für deren Summe (Ebene 2) jeweils separat für Benzin und Diesel.**

Treibstoff	Fz.kat	Unsicherheiten Emissionsfaktoren					Ebene
		CH4	CO2	N2O	NM VOC	NOx	
B	MRD	36%	0.40%	36%	36%	36%	3
B	MPD	178%	0.40%	>300%	>300%	>300%	3
B	LNF	45%	0.40%	61%	48%	36%	3
B	PKW	47%	0.40%	51%	56%	42%	3
<b>B</b>	<b>Total</b>	<b>37%</b>	<b>0.40%</b>	<b>50%</b>	<b>40%</b>	<b>39%</b>	<b>2</b>
D	BUS	28%	0.34%	25%	29%	26%	3
D	LNF	44%	0.34%	53%	45%	31%	3
D	PKW	41%	0.34%	34%	42%	28%	3
D	SNF	22%	0.34%	18%	22%	18%	3
<b>D</b>	<b>Total</b>	<b>20%</b>	<b>0.34%</b>	<b>22%</b>	<b>20%</b>	<b>14%</b>	<b>2</b>

Wie schon im Kap. 5.2 erwähnt, zeigen sich auffällige Unterschiede

- Die Unsicherheiten bei den Emissionsfaktoren der Benzin-PKW sind höher als jene der Diesel-PKW.
- Die Unsicherheiten bei den Emissionsfaktoren der SNF sind kleiner als jene der PKW.
- Die Unsicherheiten der MPD werden aufgrund der Lognormalverteilungen sehr stark asymmetrisch und damit sehr groß. Auf Stufe Emissionen sind die Unsicherheiten der MPD Emissionen hingegen 70 % bis 80 % (siehe Abb. 11 und Abb. 12).

Im Kap. 7.2 werden diese beiden Punkte diskutiert.

### **Einfluss von Korrelationen**

Die Korrelationen zwischen den Emissionsfaktoren der PKW und den LNF/MZR respektive zwischen den SNF und den Bussen hat keinen bedeutenden Einfluss auf die Resultate. Vergleichsrechnungen ohne und mit Korrelationen ergeben auf den Ebenen 2 und 3 Unterschiede im Bereich von 1 %. Die hier dargestellten Ergebnisse enthalten keine Korrelationen (Ausnahme CO<sub>2</sub>).

## 6.3 Unsicherheiten Emissionsfaktoren und Emissionen übrige Verbraucher

### 6.3.1 Schienenverkehr

Die Emissionen der Bahndieselmotoren in Deutschland wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Umweltbundesamtes gemessen und für den Realbetrieb abgeleitet (WTZ 2002). Gegenstand des Vorhabens waren die limitierten Komponenten  $\text{NO}_x$ , CO, HC und PM sowie der Kraftstoffverbrauch. Keine Informationen liefert das Vorhaben zu den Klimagasen  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$  und differenzierten HC-Komponenten.

Die Emissionen wurden für fünf repräsentative Bahnmotoren im Standardzyklus (ISO-F) sowie an weiteren stationären Motorbetriebspunkten, die im Rahmen des Vorhabens als repräsentativ für den Realbetrieb ermittelt wurden, gemessen. Einbezogen wurden auch drei weitere Motoren, deren Emissionen auf Basis von Motorkennfeldern der Hersteller abgeleitet wurden. In der Studie wurden auch die Standardabweichungen der gemessenen Werte ermittelt.

Auf Basis der Emissionsmessungen wurden die Emissionen der dieselbetriebenen Eisenbahnen in Deutschland berechnet (IFEU 2003a). Dazu wurden verschiedene Fahrzyklen des Realbetriebs mit dem Standardzyklus ISO-F verglichen. Die Unterschiede der Emissionsergebnisse für verschiedene Zyklen der einzelnen Motoren können für die Ableitung von Unsicherheiten herangezogen werden.

Schließlich erfolgte eine Hochrechnung der Emissionen des Schienenverkehrs in Deutschland. Hierbei konnten differenzierte Betriebsdaten der DB AG für die einzelnen Motoren verwendet werden. Diese können als relativ zuverlässig angesehen werden. Eine größere Fehlerbandbreite ergibt sich dadurch, dass in die Gesamtbilanz die Emissionskennwerte von Motoren eingehen, für die nur Typprüfwerte (ISO-F-Zyklus) vorlagen. Weiterhin fehlen Informationen über die Zusammensetzung und die Betriebsleistung der Dieselflotte der übrigen Bahngesellschaften, die in den letzten Jahren einen zunehmenden Anteil an den Verkehrsleistungen gewonnen haben.

#### a) Unsicherheiten der Emissionsmessungen

Die Emissionen der Bahndieselmotoren wurden in jedem Lastpunkt dreimal gemessen. Damit lässt sich eine Unsicherheit der Emissionsmessungen bestimmen:

- Zunächst wird für jeden gemessenen Motor und Lastpunkt der Fehler aus den drei Messungen berechnet.
- Anschließend wird der relative mittlere Fehler für alle Messungen aus den Einzelfehlern berechnet:

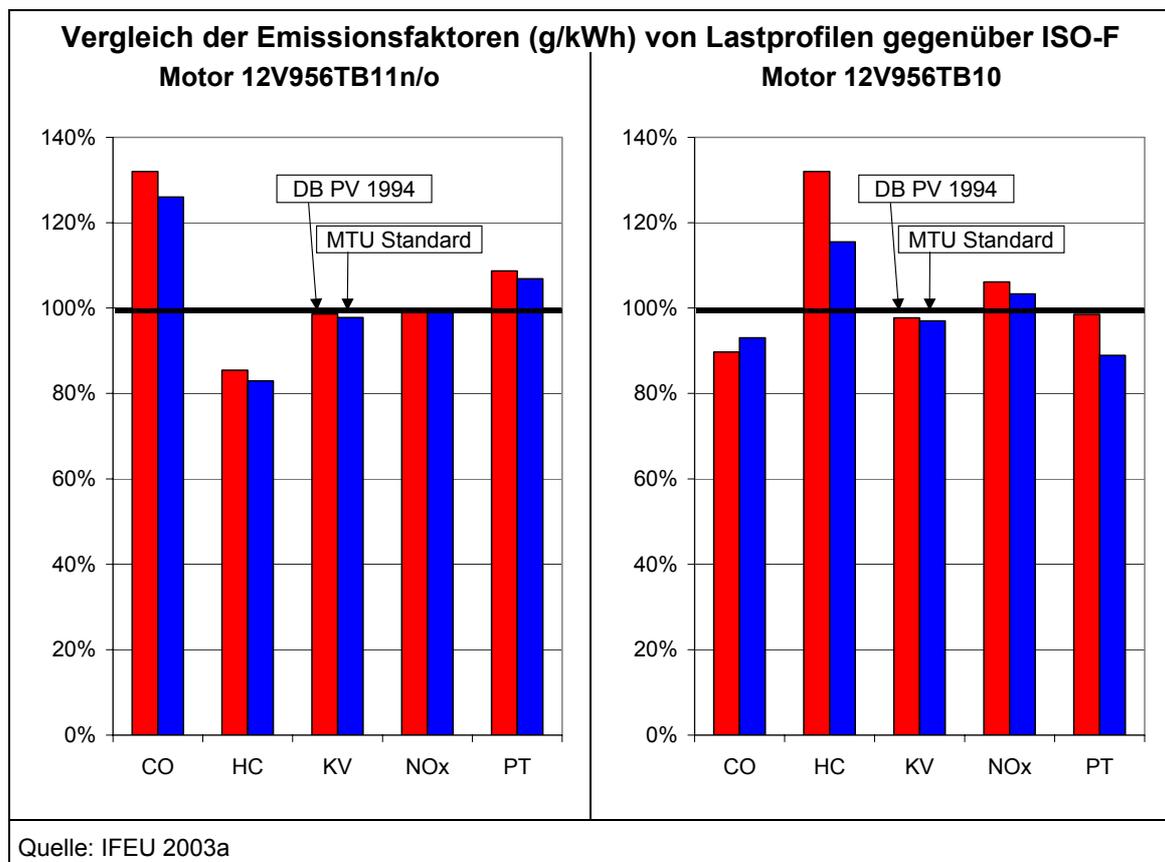
$$s_g = \sqrt{\frac{\sum s_i^2}{n}} \quad \text{s: Standardfehler, n: Anzahl der Standardfehler } s_i$$

#### b) Unsicherheiten des Realbetriebs gegenüber den gemessenen Betriebspunkten

Im Realbetrieb treten andere Betriebszustände als im ISO-F Zyklus auf, deren Anteil je Zuggattung, Zuglast und Strecke sehr unterschiedlich sein kann. Beim UBA-Messprogramm WTZ (2002) wurden daher nicht nur die Emissionen an den Betriebspunkten

ten des ISO-F-Zyklus gemessen, sondern auch an weiteren stationären Messpunkten, die im Realbetrieb (Lastprofile) auftauchen.

Es zeigte sich allerdings, dass eine repräsentative Ermittlung der verschiedenen Lastzustände im Realbetrieb im Rahmen des Projektes nicht möglich war IFEU (2003a). Daher wurden typische Fahrzyklen aus dem Realbetrieb herangezogen, deren Emissionen berechnet und mit den Emissionen aus dem ISO-F-Zyklus verglichen. Da in TREMOD die Emissionen nach dem ISO-F-Zyklus zugrunde gelegt werden, können die in der Studie berechneten Unterschiede zur Bestimmung der Fehler herangezogen werden. Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft die Abweichungen von Emissionsfaktoren definierter Fahrzyklen (Lastprofilen) vom ISO-F-Zyklus für einen bestimmten Motortyp.



**Abb. 13 Emissionsfaktoren verschiedener Lastprofile im Vergleich zum ISO-F-Zyklus**

Zur Bestimmung der Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für die Zyklen im Realbetrieb wurden die Emissionsfaktoren je kWh für die gemessenen Lastpunkte und Motoren herangezogen. Dazu wurden die Mittelwerte der Emissionsfaktoren je Prüfpunkt aus den Messungen für die sieben untersuchten Motoren (ohne Leerlauf) verwendet. Für jede Komponente wurde so der Standardfehler berechnet.

### c) weitere Einflussgrößen

Des Weiteren treten im Realbetrieb Bedingungen auf, die durch die Emissionsmessungen nicht abgedeckt wurden. Dies sind v.a.:

- Einflüsse instationärer Betriebsweise gegenüber den in statischen Betriebspunkten gemessenen Emissionen
- Einflüsse von Außentemperatur und Luftdruck (Meereshöhe)
- Wartungszustand der Maschinen
- Einflüsse unterschiedlicher Kraftstoffqualitäten

Im Rahmen dieser Untersuchung können diese Einflussparameter nicht quantifiziert werden und damit auch nicht deren Unsicherheiten.

### d) Ergebnisse

Die Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren des Schienenverkehrs werden damit mit den beiden Elementen

- Unsicherheiten der Emissionsmessung und
- Unsicherheiten Fahrzyklus Realbetrieb (Lastprofil)

bestimmt. Es erfolgte hierbei keine Gewichtung nach Betriebsleistungen einzelner Motoren und den einzelnen Betriebsarten.

Die Unsicherheiten aus der Emissionsmessung und aus dem Fahrbetrieb werden mittels Fehlerfortpflanzungsgesetz zusammengefasst. Außerdem wird die Unsicherheit für den im ZSE verwendeten energiebezogenen Emissionsfaktor ermittelt. Die folgende Tabelle zeigt das Ergebnis.

**Tab. 18 Unsicherheit der Emissionsfaktoren im Schienenverkehr**

	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>PM</b>	<b>KV</b>
Unsicherheit Messung	9,4%	23%	21%	25%	4,4%
Unsicherheit Zyklus	7,6%	25%	25%	21%	2,0%
Unsicherheit gesamt	12%	34%	32%	32%	4,9%
<b>Energiebezogene Emissionsfaktoren</b>					
Unsicherheit gesamt	13%	34%	32%	32%	-
KV: Kraftstoffverbrauch					

Für NMHC und CH<sub>4</sub> werden, wie eingangs erwähnt, mangels besserer Daten, die Unsicherheiten von HC verwendet. Für N<sub>2</sub>O lassen sich keine Unsicherheiten angeben.

### e) Kritik an dem gewählten Verfahren

Das für den Schienenverkehr gewählte Verfahren zur Bestimmung der Unsicherheiten ist ein vereinfachter Ansatz, der nicht vergleichbar mit dem Vorgehen beim Straßenverkehr ist. In Kapitel 7 wird dies im Gesamtkontext der Studie nochmals analysiert.

### **6.3.2 Binnenschifffahrt**

Für Binnenschiffe liegen aus der Literatur nur wenige Emissionsdaten vor. Eine Unterscheidung der Emissionsfaktoren in verschiedene Motortypen und Betriebszustände scheint uns nach jetzigem Kenntnisstand nicht möglich zu sein. Eine detaillierte Recherche im Rahmen dieses Projekts ist nicht möglich. Wir schlagen daher vor, die Unsicherheiten des Eisenbahnverkehrs auch für den Binnenschiffsverkehr zu übernehmen.

### **6.3.3 Bauwirtschaftlicher Verkehr**

Für die Ableitung der Emissionsfaktoren wird im ZSE TREMOD-MM verwendet. Die in TREMOD-MM verwendeten Emissionsfaktoren basieren auf einer Vielzahl von Messungen und Angaben für Dieselmotoren unterschiedlicher Größe für verschiedene Baujahre. Prinzipiell wäre also eine Fehlerrechnung möglich. Da der Focus dieser Studie auf dem Straßenverkehr lag, für den eine neue Methode entwickelt wurde, wäre es sinnvoll, eine ähnliche Methode auf den bauwirtschaftlichen Verkehr anzuwenden. Dies kann jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden. Nähere Erläuterung hierzu befinden sich in Kapitel 7 dieser Studie.

Wir schlagen daher vor, vorerst die Unsicherheiten aus dem Schienenverkehr zu übernehmen.

## 7 Beurteilung der Resultate, Empfehlungen

### 7.1 Vergleich der Unsicherheiten mit anderen Untersuchungen

#### 7.1.1 Unsicherheiten in Treibhausgasinventaren CH, SF, DK

Es folgen Beispiele von Unsicherheiten aus den Treibhausgasinventaren Schweiz, Finnland, Dänemark

**Tab. 19 Emissionsfaktoren: Unsicherheiten, die in den Treibhausgasinventaren anderer Länder angegeben sind.**

1.A.3.b Road Transportation	fuel	Unc AD %	Unc EF CO2 %	Unc EF CH4 %	Unc EF N2O %
Schweiz	Benzin	1.4	1.5	56	150
	Diesel	1.4	1.5	60	150
Finnland	Benzin	1	3	50	279 / 378 <sup>9</sup>
	Diesel	1	3	50	158
Dänemark	fl. Treibstoffe	2	5	40	50
Deutschland	Benzin	17	0.40	32	46
	Diesel	10	0.33	17	19

1.A.3.c Railways	fuel	Unc AD %	Unc EF CO2 %	Unc EF CH4 %	Unc EF N2O %
Schweiz	Diesel		10	60	150
Finnland	Diesel	5	3	110	150
Dänemark	Diesel	2	5	100	1000
Deutschland	Diesel	7.6	(0.4)	--	--

1.A.3.d Navigation	fuel	Unc AD %	Unc EF CO2 %	Unc EF CH4 %	Unc EF N2O %
Schweiz	Diesel		10	60	150
Finnland	Benzin	20	3	102	151
	Schweröl, Gasöl, Diesel	10	3	100	150
Dänemark	Diesel	11 (große Schiffe), 21 (kleine Schiffe)	5	100	1000
Deutschland	Diesel	47	(0.4)	--	--

Die Unsicherheiten für Aktivitätsraten liegen in den drei Ländern Schweiz, Finnland, Dänemark im Bereich 1 bis 5 % für Straßen- und Schienenverkehr, 10 bis 20 % im Schiffsverkehr. Bei den Emissionsfaktoren betragen die Unsicherheiten für CO<sub>2</sub> zwischen 1 und 10 %, für CH<sub>4</sub> 40 bis 110 % und für N<sub>2</sub>O 75 bis 1000 %(!)

<sup>9</sup> Mit / Ohne Katalysator

Der Vergleich mit den in dieser Studie berechneten Zahlen zeigt, dass die bottom-up berechneten Unsicherheiten der Aktivitätsraten des Straßenverkehrs mit 17 % (Benzin) und 10 % (Diesel) in Deutschland wesentlich höher liegen als in den drei zitierten Ländern. Bei den Emissionsfaktoren hingegen sind die Unsicherheiten in Deutschland deutlich geringer als in den drei Ländern. Höhere Unsicherheiten bei den Aktivitätsraten und niedrigere Unsicherheiten bei Emissionsfaktoren kompensieren sich teilweise auf der Stufe der Emissionen, sodass die Unterschiede zwischen Deutschland und den übrigen Ländern kleiner werden.

Beim Schiffsverkehr ist die Unsicherheit in der Aktivitätsrate in Deutschland höher als in den anderen Ländern, beim Schienenverkehr in ähnlicher Größe.

### 7.1.2 Vergleich mit Unsicherheiten der Dissertation Kühlwein

Die Parameter zur Beschreibung der Unsicherheiten sind in der Dissertation Kühlwein als „unterer“ und „oberer“ statistischer Fehler bezeichnet. Wenn wir den „unteren“ Fehler mit dem Standardfehler, den „oberen“ Fehler mit der Unsicherheit (U95%) identifizieren, so ergeben sich folgende Korrespondenzen.

**Tab. 20 Vergleich der Unsicherheiten von NO<sub>x</sub>- und NMVOC-Emissionen für die neuen Resultate aus Tab. 17 mit den Zahlen von (Kühlwein 2004) (siehe dort Seite 60).**

Schadstoff	Kühlwein (2004) „oberer statistischer Fehler“	IFEU/INFRAS (2009) Unsicherheit (95%)	
		Benzin	Diesel
NO <sub>x</sub>	35%	35%	10%
NMVOC Auspuff?	48%	35%	17%

Beim Benzin gibt es eine gute Übereinstimmung zwischen den neuen Ergebnissen und den Resultaten von Kühlwein, während die Resultate der vorliegenden Studie für Diesel deutlich geringere Unsicherheiten ergeben.

### 7.1.3 Modellvergleiche

Für die Berechnung von Emissionen bestehen bekanntlich verschiedene Möglichkeiten und Modelle, welche für sich beanspruchen, eine bestmögliche Abschätzung der Emissionen vorzunehmen. Ein Vergleich der Emissionsberechnungen verschiedener Modelle (oder auch verschiedener Modellversionen) kann deshalb Hinweise auf die Unsicherheiten der Ergebnisse liefern:

- Winther (1998) hat Emissionsfaktoren von Benzin-PKW gemäß COPERT II, dem damaligen Handbuch E-Faktoren HBEFA 1.1, dem damals in Dänemark eingesetzten Modell der DTU (Danische Technischen Universität) und in Dänemark gemessenen Fahrzeugen verglichen. Für VOC wies das dänische Modell um 33 % tiefere Emissionen aus als COPERT II, HBEFA 1.1 lag rund 4 % höher als COPERT II; bei NO<sub>x</sub> lag HBEFA 1.1 ähnlich wie das dänische Modell und rund 12 % unter COPERT II.

- Sjödin et. al. (2006) haben das nationale schwedische Modell EMV mit dem Modell ARTEMIS verglichen und dabei den gleichen Satz von Verkehrsaktivitäten unterstellt, mithin also die Emissionsfaktoren verglichen. Dabei waren die NO<sub>x</sub>-Emissionen mit dem ARTEMIS-Modell für das Bezugsjahr 2004 19 % höher als im EMV. Die VOC-Emissionen lagen gar 42 % höher, wobei dies vor allem auf die Verdampfungsemissionen zurückzuführen ist, während die „konventionellen“ Abgasemissionen etwa vergleichbar sind.

Die Betrachtungen zeigen, dass es zwischen verschiedenen Modellansätzen durchaus größere Unterschiede gibt. Das ist nicht erstaunlich, weil die Unsicherheit kein absolutes Merkmal, sondern von der Messmethode abhängig ist. (So hängt etwa bei einer Längenmessung die Genauigkeit davon ab, ob der Maßstab eine Zentimeter- oder eine Millimeter-Skala besitzt.)

### Resultate aus demselben Modell im Vergleich zwischen einer früheren mit einer späteren Modellversion

Ähnliche Hinweise zur Größenordnung der Unsicherheit lassen sich auch aus einem Vergleich von Versionen des gleichen Modells ableiten. In INFRAS 2000 und in INFRAS 2004a wurden beispielsweise die Emissionen des Straßenverkehrs für die Schweiz für ganze Zeitreihen berechnet. Die Studie in 2004 ist eine Aktualisierung der Studie aus dem Jahr 2000. Die folgende Tabelle zeigt Resultate für die Jahre 2005 und 2010 im Vergleich. Die Differenzen zwischen den beiden Versionen geben einen Hinweis auf die Unsicherheit der Resultate

**Tab. 21 Vergleich der NO<sub>x</sub> und VOC-Emissionen 2005 und 2010 aus /INFRAS 2000 und 2005/**

	Emissionen 2005			Emissionen 2010		
	INFRAS (2000) 1000 t/a	INFRAS (2004) 1000 t/a	Differenz (%)	INFRAS (2000) 1000 t/a	INFRAS (2004) 1000 t/a	Differenz (%)
NO <sub>x</sub>	56.4	42.7	-24%	59.0	33.0	-44%
VOC	24.4	19.8	-19%	23.2	13.6	-42%

Die Differenzen zwischen früherer und späterer Modellversion liegen für das Bezugsjahr 2005 im Bereich von 20 %, wobei neben den Modellunsicherheiten in der früheren Version noch eine Prognoseunsicherheit dazukommt. Diese wirkt sich – nicht erstaunlich - umso stärker aus, je weiter in die Zukunft geblickt wird: im Jahr 2010 sind die Unterschiede bereits doppelt so groß.

### Vergleich von Ergebnissen für den Nicht-Straßenverkehr

Für den **Schieneverkehr** liegt zum Vergleich die Rail Diesel Studie der UIC vor (UIC 2006), deren Ergebnisse auch im EMEP EEA Handbuch (EMEP 2009a) dokumentiert sind. Die angegebenen Bandbreiten der Emissionsfaktoren sind deutlich größer als in dieser Studie, wobei der Ansatz ein völlig anderer ist:

In dieser Studie wurde versucht, die Unsicherheit der Messungen und die Unsicherheit der Zyklen im Realbetrieb für die Emissionsfaktoren abzubilden. In der Rail Diesel Studie wird die Bandbreite der Emissionsfaktoren verschiedener Motoren mit verschiedenen Baujahren bzw. entsprechender Mittelwerte verschiedener Bahngesellschaften angegeben, die sich alle auf einen Zyklus (ISO-F) beziehen. Es ist plausibel, dass bei einer solchen Auswahl die Bandbreite der Daten deutlich größer ist als bei dem hier gewählten Verfahren.

Für den **bauwirtschaftlichen Verkehr** liegen Ergebnisse aus einer aktuellen Untersuchung von INFRAS für die Schweiz vor (INFRAS 2008). In IFEU 2009a wurden die Emissionsfaktoren (in g/kWh) aus dieser Studie mit den IFEU-Werten - differenziert nach Motorleistung und Grenzwert- bzw. Altersstufe – verglichen:

- Bei den Stickstoffoxiden sind die Abweichungen zwischen den beiden Studien in keinem Fall über 50 %. Abweichungen zwischen 30 und 50 % gibt es bei den kleinen Motoren der Stufe 1 und 2 sowie bei den alten, mittelgroßen Maschinen. Bei allen anderen Werten sind die Abweichungen unter 30 %
- Die Abweichungen bei den Kohlenwasserstoffemissionen sind tendenziell höher und betragen bis zu 82 %. Höhere Abweichungen gibt es auch bei Kohlenmonoxid und Partikeln.
- Erwartungsgemäß gibt es beim Kraftstoffverbrauch kaum Unterschiede.

## 7.2 Beurteilung der Resultate für den Straßenverkehr

### Methode

Im Angebot für das vorliegende Projekt steht der Abschnitt „Eine Bottom-up-Modellierung der Unsicherheiten, die die Auswahl der Fahrzeuge für die Emissionsmessungen, Messunsicherheiten, Repräsentativität der Testzyklen und Auswahl der Teilzyklen für die repräsentativen Emissionsfaktoren der Fahrmuster berücksichtigt, ist im vorgegebenen Zeitrahmen nicht leistbar. Eine Dissertation aus Deutschland diskutiert jedoch solche Fragen und legt auch Berechnungen zu Unsicherheiten vor. Deren Ergebnisse können für die vorliegende Fragestellung verwendet werden. Darüber hinaus gibt es für andere Emissionsmodelle bereits Unsicherheitsabschätzungen, die ebenfalls berücksichtigt werden können.“

Beim Versuch, auf der besagten Dissertation aufzubauen, zeigte sich, dass die dort benutzten Datenstrukturen sich nicht in der Weise differenzieren lassen, wie es die ZSE-Datenstruktur erfordert und dass faktisch keine brauchbaren Informationen über Klimagase, die für das vorliegende Projekt gefragt sind, gewonnen werden können. Gleichzeitig zeigte sich, dass mit den beiden Datenbanken zu den Emissionsmessdaten Grundlagen vorliegen, um mindestens teilweise eine Bottom-up-Berechnung durchzuführen. Diese wurde nun im Rahmen dieser Untersuchung erstmalig durchgeführt und die Resultate in den obigen Kapiteln dokumentiert. Hierbei ist der Hinweis wichtig, dass es sich nicht um eine vollständige Bottom-up-Rechnung in dem Sinne handelt, dass die Unsicherheiten von der Messapparatur an im vorliegenden Projekt aufgearbeitet worden wären.

Die inzwischen gewonnenen Ergebnisse für die Unsicherheiten von Aktivitätsraten, Emissionsfaktoren und Emissionen zeigen Merkmale, die teils erwartet, teils aber auch uner-

wartet sind. Hier soll versucht werden, Gründe zu nennen, warum das so ist – oder warum die Gründe dafür noch nicht bekannt sind. Zudem werden Empfehlungen formuliert, um die gewonnenen Ergebnisse weiter zu entwickeln und zu verbessern.

### **Unerwartete Ergebnisse**

1. Hohe Unsicherheiten der Verbrauchsdaten
2. Systematisch niedrigere Unsicherheiten bei den Diesel- als bei den Benzinfahrzeugen
3. Systematisch tiefere Unsicherheiten bei den SNF als bei den übrigen Fahrzeugkategorien
4. Im Vergleich mit ausländischen Literaturquellen sind die N<sub>2</sub>O-Unsicherheiten in der vorliegenden Untersuchung relativ niedrig.

### **Begründungen und Empfehlungen**

#### *Gründe zu 1. Hohe Unsicherheiten der Verbrauchsdaten*

- Die Unsicherheiten werden bottom-up aus einer relativ kleinen Stichprobe hochgerechnet. Die Vergleichsdaten der anderen Länder basieren hingegen auf top-down Schätzungen der Unsicherheiten, ausgehend von Import-/Exportstatistiken.
- Die Unsicherheiten der Aktivitätsraten des Straßenverkehrs enthalten Anpassungsfaktoren für Benzin und Diesel, die selber mit einer Unsicherheit behaftet sind und so zu einer Vergrößerung der Unsicherheiten beitragen.

#### *Empfehlungen*

Eine Top-down-Schätzung der Unsicherheit für Deutschland auf der Basis der Energiebilanz wäre wünschenswert. Voraussetzung ist die Erstellung eines widerspruchsfreien Mengengerüsts von Inlandsabsatz, Verbrauch der Inländer und Verbrauch im Inland (Territorialprinzip wie in TREMOD und TREMOD-MM) der verschiedenen Sektoren und müsste damit auch quantitative Schätzungen für den „Tanktourismus“ enthalten, sodass auf die einseitige Anpassung der Aktivitätsraten beim Straßenverkehr verzichtet werden kann.

#### *Gründe zu 2. Systematisch tiefere Unsicherheiten bei den Diesel- als bei den Benzinfahrzeugen*

- Ein Vergleich der Messdaten und deren Streuungen in der Datenbank der PKW zeigt, dass die relativen Unsicherheiten der Diesel-PKW bereits auf dieser tiefsten Ebene effektiv systematisch niedriger sind. Diese Unterschiede übertragen sich auf die Ebenen 5 bis 2.
- Die Benzin-PKW der jüngeren Euro-Klassen emittieren mittlerweile auf einem sehr tiefen absoluten Niveau, sodass große Abweichungen wahrscheinlicher und damit die relativen Unsicherheiten größer werden.

#### *Empfehlung*

Die Messwerte in der Datenbank müssten sorgfältig auf ihre Qualität hin untersucht werden. Die Tauglichkeit der verwendeten Fahrzyklen muss auf ihre Verwendungsmöglichkeit

hin überprüft werden. Ggf. wären einzelne Datensätze zu eliminieren. Eine solche Arbeit war im vorgegebenen Zeit- und Finanzrahmen nicht zu erbringen.

#### *Gründe zu 3. Systematisch tiefere Unsicherheiten bei den SNF als bei den übrigen Fahrzeugkategorien*

- Die Standardfehler in den SNF-Messdaten (Rexeis 2009) sind im Vergleich mit den PKW relativ niedrig. Dieser Unterschied zieht sich durch die Ebenen 5, 4 und 3 hindurch.
- Die Unsicherheiten der PKW und der SNF werden auf unterschiedliche Weisen hergeleitet. Die niedrigen Standardfehler in den Messdaten der SNF können durch eine höhere Anzahl von Messdaten entstehen (Standardfehler ist umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Anzahl Messdaten). Das wäre ein Unterschied statistischer Natur.
- Der Unterschied könnte auch methodisch bedingt sein durch die Verwendung der SNF-Emissionsfunktion mit dem „durchschnittlichen Motorlastkollektiv“. Diese Methode ist grundsätzlich verschieden vom Vorgehen bei den PKW, bei dem von der Streuung von Fahrzyklen ausgegangen wird. Diese methodischen Unterschiede lassen sich mit dem heutigen Wissenstand nicht quantifizieren
- Bei den SNF existieren nur Messdaten zur Summe der VOC, nicht aber zu den NMVOC und dem CH<sub>4</sub> separat. Mangels weiterer Informationen wurden die relativen Unsicherheiten der VOC als Proxi für die Unsicherheiten für NMVOC und (gewagterweise auch) für CH<sub>4</sub> benutzt. Für NMVOC mag diese Näherung noch genügen, für CH<sub>4</sub> ist sie mit sehr großer Wahrscheinlichkeit zu optimistisch. Man darf deshalb davon ausgehen, dass die Unsicherheiten für CH<sub>4</sub> zu niedrig sind.

#### *Empfehlungen*

Die statistischen und methodischen Elemente zur Bestimmung der Unsicherheiten bei den SNF müsste in ihren Einzelheiten ausgeleuchtet und mit der Methode der PKW verglichen werden. Für CH<sub>4</sub> sollten Messdaten recherchiert werden.

#### *Gründe für 4. Relativ tiefe Unsicherheiten bei den N<sub>2</sub>O Emissionsfaktoren*

- Die Datenbasis für die Auswertung der N<sub>2</sub>O-Daten ist statistisch ungenügend. Es gibt zwar inzwischen eine Datenbank mit N<sub>2</sub>O-Messdaten. Diese sind aber noch nicht ausgewertet und standen deshalb für die vorliegende Studie nicht zur Verfügung. Alternativ wurden Streuungen von Modellwerten benutzt, um die Unsicherheiten abzuschätzen. Die Qualität dieser Schätzung lässt sich nicht ohne weiteres beurteilen. Solange keine vertiefte Auswertung von Messdaten vorliegt, bleibt auch offen, ob die Resultate in den publizierten, ausländischen Studien realistischer sind als die hier modellierten Werte.

#### *Empfehlungen*

Die für die Aktualisierung des Handbuchs Emissionsfaktoren (HBEFA) gesammelten N<sub>2</sub>O-Messdaten sollten bezüglich Unsicherheiten vertieft ausgewertet werden.

## 7.3 Beurteilung der Resultate für die übrigen Verbraucher

### Methode

Die Unsicherheiten von Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren der Sektoren 1.A.3.c bis 1.A.3.e konnten im Rahmen dieser Studie nur grob bzw. exemplarisch ermittelt werden. Neben der teilweise schlechten Datenlage ist ein wichtiger Grund dafür, dass zunächst eine belastbare Methodik für den Straßenverkehr entwickelt werden sollte, die auch für die übrigen Sektoren verwendbar ist. Allerdings erwies sich die Methodenentwicklung im Bereich Straßenverkehr als so aufwendig, dass sie im Rahmen dieser Studie zwar soweit entwickelt werden konnte, dass belastbare Ergebnisse gewonnen werden konnten, aber auch noch offene Fragen und Probleme bestehen (siehe Ausführungen voriges Kapitel).

Aus diesen Gründen beruht die Bestimmung der Unsicherheiten der Aktivitätsraten auf einfachen Fehlerrechnungen, wobei beim Eisenbahnverkehr die beste Datenbasis vorlag. Die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren wurden exemplarisch für den Eisenbahnverkehr ermittelt. Die dabei gewählte Methode ist jedoch lediglich ein erster Ansatz, der zwar deutlich über eine einfache Fehlerrechnung für vorliegende Werte hinausgeht, im Detail jedoch noch weiterentwickelt werden sollte in Anlehnung an die Methodik beim Straßenverkehr. Beispielsweise wurden weder repräsentative Anteile verschiedener Motoren und Zyklen im Realbetrieb noch mögliche Korrelationen berücksichtigt.

### Besonderheiten bei den Unsicherheiten der Aktivitätsraten

Die Unsicherheiten der Aktivitätsraten der Binnenschifffahrt und Bauwirtschaft haben ein hohes Niveau. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die vorliegenden Werte von verschiedenen Akteuren ermittelt werden, die jeweils unterschiedliche Basisinformationen verwenden, die den anderen Akteuren nicht zur Verfügung stehen. Hervorzuheben ist hierbei insbesondere die nicht dokumentierte und daher nicht nachvollziehbare Vorgehensweise der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen bei der Zuordnung der Absatzzahlen auf die einzelnen Sektoren.

Aufgrund der mangelhaften Informationen ermittelt das Umweltbundesamt die Aktivitätsraten der Bauwirtschaft für ZSE bisher mit einem pauschalen Anteilfaktor. Aus dem gleichen Grund werden in TREMOD für den Straßenverkehr, die Eisenbahn und Binnenschifffahrt pauschale Anpassungsfaktoren verwendet, um die nach Territorialprinzip berechneten Inlandsverbräuche auf die Energiebilanz zu korrigieren, ohne eine Aussage darüber machen zu können, welche konkreten Ursachen zu welchen Differenzen führen.

### Empfehlungen für weitere Schritte

- Verbesserung der Daten für die Aktivitätsraten aller Sektoren mit Plausibilisierung der Energie-, Inlands- und Inländerbilanz und nachvollziehbare Beschreibung der Methodik.
- Weiterentwicklung der neuen Methode zur Bestimmung der Unsicherheiten im Straßenverkehr und Übertragung auf die übrigen Sektoren.
- Verwendung der gleichen Methode für den Sektor „Landwirtschaft“.
- Verbesserung der Informationen zum Energieverbrauch und Emissionsverhalten des Schiffsverkehrs.
- Verbesserung der Informationen zu den Klimagasen  $N_2O$  und  $CH_4$  für den Nicht-Straßenverkehr

## 8 Literaturverzeichnis

**AG Energiebilanzen** Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland; verschiedenen Jahrgänge; [www.ag-energiebilanzen.de](http://www.ag-energiebilanzen.de)

**BAFA:** Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Amtliche Mineralölstatistiken; Verschiedene Monats- und Jahresstatistiken

**BAST 1998** Laffont, S. et al., Heusch/Boesefeldt : Erhebungs- und Hochrechnungsmethodik für die Durchführung von Straßenverkehrszählungen (SVZ 2000) ; Reihe Verkehrstechnik, Heft V59 ; Aachen 1998

**BAST 2007** Kathmann, T. et al., DTV Verkehrsconsult GmbH: Straßenverkehrszählung 2005; Reihe Verkehrstechnik, Heft V164

**BAST 2009** Fitschen, A.: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2007; Reihe Verkehrstechnik, Heft V176

**DB 2009:** Deutsche Bahn AG – Bahn Umwelt Zentrum: Kennzahlen zu Verkehrs- und Betriebsleistungen, Energieverbräuchen und Emissionen des Schienenverkehrs der DB AG 1995-2008 für TREMOD; April 2009, Aktualisierung jährlich

**DIW 2005:** Kunert, U. et al: Aktualisierung und Weiterentwicklung der Berechnungsmodelle für die Fahrleistungen von Kraftfahrzeugen und für das Aufkommen und für die Verkehrsleistungen im Personenverkehr (MIV); im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen; Berlin, April 2005

**EMEP 2009a:** EMEP EEA Emission Inventory Guidebook 2009; 1-A-3-c Railways; SNAP 080200

**EMEP 2009b:** EMEP EEA Emission Inventory Guidebook 2009; 1-A-3-d Navigation

**EMEP 2009c:** EMEP EEA Emission Inventory Guidebook 2009; 1-A-4 Non-road mobile machinery and sources

**FEA 2009:** Submission under the UNFCCC 2009. National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990-2007. Federal Environment Agency (Umweltbundesamt). Dessau. 15 April 2009.

**Heusch-Boesefeldt 1996** Palm, I., Regniet, G., Schmidt, G., Heusch-Boesefeldt: Ermittlung der Pkw- und Nfz-Jahresfahrleistungen 1993 auf allen Straßen in der Bundesrepublik Deutschland; im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Aachen 1996

**IFEU 2003a:** Knörr, W. et al.: Erarbeitung von Basisemissionsdaten des dieselbetriebenen Schienenverkehrs unter Einbeziehung möglicher Schadstoffminderungstechnologien – Weiterführung und Auswertung des UBA-FuE-Vorhabens 299 43 111; im Auftrag der Deutschen Bahn AG; Heidelberg, 2003

**IFEU 2003b:** Knörr, W. et al.: Überarbeitung des Datentransfers zwischen den Datenbanken TREMOD (Transport Emission Model) und ZSE („Zentrales System Emissionen“); im Auftrag des Umweltbundesamtes, UFOPLAN Nr. 201 41 261/03; Heidelberg, 2003

**IFEU 2003c:** Lambrecht, U: et al., IFEU: Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Verbrennungsmotoren in mobilen Geräten und Maschinen; im Auftrag des Umweltbundesamtes, UFOPLAN Nr. 299 45 113; Heidelberg, 2003

**IFEU 2005** Knörr, W. et al.: Fortschreibung „Daten- und Rechenmodell“: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“; Im Auftrag des Umweltbundesamtes, UFOPLAN Nr. 204 45 139, Heidelberg, November 2005

**IFEU 2009a** Helms, H. et al: Aktualisierung des Modells TREMOD – Mobile Machinery (TREMOMM); im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 360 10 018, Februar 2009

**IFEU 2009b:** „Fortschreibung und Erweiterung Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 (TREMOMM); Im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ Nr. 3707 45 101, Abschluss bevorstehend

- INFAS-DIW 2003:** Follmer, R. et al, INFAS, Kunert, U. et. Al, DIW: Mobilität in Deutschland 2002 – Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten; Projektnummer 70.0681/2001 im Forschungsprogramm Stadtverkehr des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen; Endbericht, Juni 2003
- INFRAS 2005:** Kljun N., Keller M. and de Haan, P. Design of A300 Database, ARTEMIS Deliverable WP 3311, Bern 2005
- INFRAS 2008** Schöffeler, U. und M. Keller: Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors. Studie für die Jahre 1980–2020. Umwelt-Wissen Nr. 0828. Bundesamt für Umwelt. Bern 2008.
- INFRAS et.al. 2000:** de Haan, P., Keller M., Stahel W., Pritscher L., Neues EMPA Standard-Messprogramm, BAFU-Arbeitsunterlage 19, Bern Juni 2000
- INFRAS 2000:** Keller, M. et al.: Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950-2010. Aufdatierung der Schriftenreihe Umwelt Nr. 255. Bern 2000
- INFRAS 2004a:** Keller, M. et al.: Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1980-2030. Schriftenreihe Umwelt Nr. 355. Bern 2004
- INFRAS 2004b:** Keller, M. et al.: Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 2.1; im Auftrag des Umweltbundesamtes in Deutschland, des Umweltbundesamtes in Österreich und des BUWAL der Schweiz; Bern/Zürich 2004
- INFRAS 2009a:** Keller, M. et al.: Datenbank der Messwerte von PKW, Datengrundlage für die Aktualisierung des Handbuchs für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 3.1; im Auftrag des Umweltbundesamtes in Deutschland, des Umweltbundesamtes in Österreich und des BUWAL der Schweiz; Bern. Die Datenbank ist ein internes Instrument, keine Publikation vorgesehen.
- INFRAS 2009b:** Keller, M. et al.: Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 3.1; im Auftrag des Umweltbundesamtes in Deutschland, des Umweltbundesamtes in Österreich und des BUWAL der Schweiz; Bern. Publikation in Vorbereitung
- INRETS 2004:** André Michel, Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions: The ARTEMIS European driving cycles (Part A), Inrets Report n° INRETS-LTE 0411, Bron June 2004
- INRETS 2005:** André Jean Marc, Vehicle emission measurement collection of the ARTEMIS database, Artemis Deliverable WP 3312, Inrets Report n° LTE 0504, Bron January 2005
- IPCC 1997:** Greenhouse Gas Inventory Reference Manual, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reporting Instructions (Volume 1). Intergovernmental Panel on Climate Change.  
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs4.htm>
- IPCC 2000:** Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories (IPCC GPG). Intergovernmental Panel on Climate Change  
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>
- IVS 2003** Wermuth, M. et al., IVS, zusammen mit IVT, WVI, KBA, P.U.T.V: Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KiD 2002) – Kontinuierliche Befragung des Wirtschaftsverkehrs in Unterschiedlichen Siedlungsräumen; im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen; FE-Nr. 70.0682/2001, November 2003
- IVT 1994:** Hautzinger, H. et al., IVT: Fahrleistung und Unfallrisiko von Kraftfahrzeugen; Schlussbericht zur Fahrleistungserhebung 1993; im Auftrag der BAST Bergisch Gladbach 1994
- IVT 2004:** Hautzinger, H. et al., IVT: Fahrleistungserhebung 2002, Band 2: Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko; Untersuchung im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen; Heilbronn/Mannheim, November 2004
- KBA:** Kraftfahrt-Bundesamt: Fahrzeugstatistik der in Deutschland gemeldeten Kraftfahrzeuge; verschiedene Publikation und Datenbankauswertung für TREMOD
- Kühlwein 2004:** Kühlwein, J. Unsicherheiten bei der rechnerischen Ermittlung von Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs und Anforderungen an zukünftige Modelle. Dissertation am Insti-

tut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart, 2004  
[http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2004/2079/pdf/Dissertation\\_Joerg\\_Kuehlwein.pdf](http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2004/2079/pdf/Dissertation_Joerg_Kuehlwein.pdf)

**MWV 2008** persönliche Auskunft Herr Lorenz, MWV, Juli 2008

**MWV 2009a:** Mineralölwirtschaftverband: MWV-Jahresbericht, Mineralölzahlen 2008;  
[www.mwv.de](http://www.mwv.de)

**MWV 2009b** persönliche Auskunft von Herrn Rossbach, MWV, Februar und Juni 2009

**Öko-Institut 2007:** Matthes, F., Öko-Institut: CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für flüssige Brennstoffe; Berlin, Juni 2007

**Rexeis 2009:** Rexeis M., Ascertainment of Real World Emissions of Heavy Duty Vehicles. Dissertation at the Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology, 2009

**Sjödin A, et.al. 2004:** Evaluation of the COPERT III emission model with on-road optical remote sensing measurements, Atmospheric Environment, Volume 38, Issue 38, December 2004, Pages 6631-6641

**Sjödin A, et.al. 2006:** Implementation and Evaluation of the ARTEMIS Road Model for Sweden's International Reporting Obligations on Air Emissions, 17th International Conference 'Transport and Air Pollution' 2008, Graz

**UIC 2006** Rail Diesel Study, von AEA Technology Environment, Euromot, UNIFE und UIC, 2006

**Winther M., 1998:** Petrol passenger car emissions calculated with different emission models, The Science of The Total Environment, Volume 224, Issues 1-3, 11 December 1998, Pages 149-160

**WTZ 2002:** Pittermann, R.: Ermittlung von Basisemissionsdaten des dieselpbetriebenen Schienenverkehrs; Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 299 43 111; im Auftrag des Umweltbundesamtes; Rosslau, Januar 2002

**ZSE 2008** Datenbank Zentrales System Emissionen des Umweltbundesamtes

## 9 Anhang Aktivitätsraten

Tab. 22 Übersicht über die Aktivitätsraten Straßenverkehr 2007 und ihre Unsicherheiten.

Energie	Fz.kat.	Technik	Str.kat	Verbrauch		Ebene
				Wert 2007 TJ	Unsicherheit %	
B	KKR	KO	AO	1'205	35%	5
B	KKR	KO	IO	3'012	62%	5
B	KR	KO	AB	1'047	35%	5
B	KR	KO	AO	4'235	35%	5
B	KR	KO	IO	1'989	62%	5
B	KR	MT	AB	808	28%	5
B	KR	MT	AO	3'348	22%	5
B	KR	MT	IO	1'650	39%	5
B	LNF	KO	AB	782	35%	5
B	LNF	KO	AO	537	35%	5
B	LNF	KO	IO	1'366	62%	5
B	LNF	MT	AB	1'722	27%	5
B	LNF	MT	AO	1'149	22%	5
B	LNF	MT	IO	3'103	39%	5
B	PKW+	KO	AB	4'733	35%	5
B	PKW+	KO	AO	6'616	35%	5
B	PKW+	KO	IO	8'760	62%	5
B	PKW+	MT	AB	267'358	28%	5
B	PKW+	MT	AO	264'605	22%	5
B	PKW+	MT	IO	316'708	39%	5
D	BUS	KO	AB	2'108	49%	5
D	BUS	KO	AO	3'193	50%	5
D	BUS	KO	IO	2'188	58%	5
D	BUS	MT	AB	7'490	31%	5
D	BUS	MT	AO	12'747	27%	5
D	BUS	MT	IO	11'102	41%	5
D	LNF	KO	AB	3'384	49%	5
D	LNF	KO	AO	2'078	50%	5
D	LNF	KO	IO	4'849	59%	5
D	LNF	MT	AB	32'988	31%	5
D	LNF	MT	AO	19'335	27%	5
D	LNF	MT	IO	42'605	41%	5
D	PKW+	KO	AB	7'728	50%	5
D	PKW+	KO	AO	9'982	50%	5
D	PKW+	KO	IO	11'323	59%	5
D	PKW+	MT	AB	136'882	31%	5
D	PKW+	MT	AO	120'717	27%	5
D	PKW+	MT	IO	138'064	42%	5
D	SNF+	KO	AB	5'884	18%	5
D	SNF+	KO	AO	7'850	20%	5
D	SNF+	KO	IO	8'616	36%	5
D	SNF+	MT	AB	299'220	17%	5
D	SNF+	MT	AO	108'936	19%	5
D	SNF+	MT	IO	71'616	36%	5
B	KKR	KO	alle	4'218	46%	4
B	KR	KO	alle	7'270	27%	4
B	KR	MT	alle	5'806	17%	4
B	LNF	KO	alle	2'685	34%	4
B	LNF	MT	alle	5'975	22%	4
B	PKW+	KO	alle	20'109	31%	4
B	PKW+	MT	alle	848'671	18%	4
D	BUS	KO	alle	7'489	30%	4
D	BUS	MT	alle	31'338	20%	4
D	LNF	KO	alle	10'311	33%	4
D	LNF	MT	alle	94'928	22%	4
D	PKW+	KO	alle	29'033	31%	4
D	PKW+	MT	alle	395'662	20%	4
D	SNF+	KO	alle	22'349	16%	4
D	SNF+	MT	alle	479'772	13%	4
B	KKR	alle	alle	4'218	46%	3
B	KR	alle	alle	13'077	17%	3
B	LNF	alle	alle	8'660	18%	3
B	PKW+	alle	alle	868'780	18%	3
D	BUS	alle	alle	38'827	17%	3
D	LNF	alle	alle	105'239	20%	3
D	PKW+	alle	alle	424'695	19%	3
D	SNF+	alle	alle	502'121	12%	3
B	alle	alle	alle	894'734	17%	2
D	alle	alle	alle	1'070'882	10%	2

## 10 Anhang Emissionsfaktoren

**Tab. 23 Übersicht über die Emissionsfaktoren Straßenverkehr 2007 und ihre Unsicherheiten.**

Energie	Fz.kat.	Technik	Str.kat	Schadstoff	Einheit	EF			Ebene
						Wert	Urel unten	Urel oben	
D	BUS	KO	AB	CH4	kg/TJ	1.2	27%	27%	5
D	BUS	KO	AB	N2O	kg/TJ	0.8	36%	50%	5
D	BUS	KO	AB	NMVOC	kg/TJ	49.8	27%	27%	5
D	BUS	KO	AB	NOX	kg/TJ	997.6	19%	19%	5
D	BUS	KO	AO	CH4	kg/TJ	1.6	27%	27%	5
D	BUS	KO	AO	N2O	kg/TJ	1.3	37%	50%	5
D	BUS	KO	AO	NMVOC	kg/TJ	65.1	26%	26%	5
D	BUS	KO	AO	NOX	kg/TJ	1034.2	19%	19%	5
D	BUS	KO	IO	CH4	kg/TJ	3.8	27%	27%	5
D	BUS	KO	IO	N2O	kg/TJ	1.0	37%	51%	5
D	BUS	KO	IO	NMVOC	kg/TJ	155.3	27%	27%	5
D	BUS	KO	IO	NOX	kg/TJ	1011.2	20%	20%	5
D	BUS	MT	AB	CH4	kg/TJ	0.8	25%	25%	5
D	BUS	MT	AB	N2O	kg/TJ	0.7	37%	50%	5
D	BUS	MT	AB	NMVOC	kg/TJ	34.0	25%	25%	5
D	BUS	MT	AB	NOX	kg/TJ	640.9	12%	12%	5
D	BUS	MT	AO	CH4	kg/TJ	0.8	25%	24%	5
D	BUS	MT	AO	N2O	kg/TJ	1.1	36%	50%	5
D	BUS	MT	AO	NMVOC	kg/TJ	34.5	25%	25%	5
D	BUS	MT	AO	NOX	kg/TJ	720.1	11%	12%	5
D	BUS	MT	IO	CH4	kg/TJ	1.2	25%	25%	5
D	BUS	MT	IO	N2O	kg/TJ	0.9	37%	50%	5
D	BUS	MT	IO	NMVOC	kg/TJ	49.6	25%	25%	5
D	BUS	MT	IO	NOX	kg/TJ	771.4	12%	12%	5
D	LNF	KO	AB	CH4	kg/TJ	0.3	28%	35%	5
D	LNF	KO	AB	N2O	kg/TJ	0.0	56%	96%	5
D	LNF	KO	AB	NMVOC	kg/TJ	13.1	27%	34%	5
D	LNF	KO	AB	NOX	kg/TJ	321.6	28%	28%	5
D	LNF	KO	AO	CH4	kg/TJ	0.6	31%	40%	5
D	LNF	KO	AO	N2O	kg/TJ	0.0	56%	94%	5
D	LNF	KO	AO	NMVOC	kg/TJ	23.5	31%	41%	5
D	LNF	KO	AO	NOX	kg/TJ	278.0	29%	28%	5
D	LNF	KO	IO	CH4	kg/TJ	1.8	32%	41%	5
D	LNF	KO	IO	N2O	kg/TJ	0.0	56%	94%	5
D	LNF	KO	IO	NMVOC	kg/TJ	72.9	24%	28%	5
D	LNF	KO	IO	NOX	kg/TJ	257.2	36%	35%	5
D	LNF	MT	AB	CH4	kg/TJ	0.2	42%	43%	5
D	LNF	MT	AB	N2O	kg/TJ	1.1	55%	94%	5
D	LNF	MT	AB	NMVOC	kg/TJ	6.4	41%	40%	5
D	LNF	MT	AB	NOX	kg/TJ	324.2	25%	25%	5
D	LNF	MT	AO	CH4	kg/TJ	0.3	36%	37%	5
D	LNF	MT	AO	N2O	kg/TJ	1.7	55%	94%	5
D	LNF	MT	AO	NMVOC	kg/TJ	11.3	42%	42%	5
D	LNF	MT	AO	NOX	kg/TJ	270.1	13%	13%	5
D	LNF	MT	IO	CH4	kg/TJ	0.9	42%	42%	5
D	LNF	MT	IO	N2O	kg/TJ	1.8	56%	94%	5
D	LNF	MT	IO	NMVOC	kg/TJ	35.8	42%	43%	5
D	LNF	MT	IO	NOX	kg/TJ	271.6	13%	13%	5

Energie	Fz.kat.	Technik	Str.kat	Schadstoff	Einheit	EF			Ebene
B	LNF	KO	AB	CH4	kg/TJ	9.2	38%	53%	5
B	LNF	KO	AB	N2O	kg/TJ	0.0	75%	168%	5
B	LNF	KO	AB	NMVOG	kg/TJ	263.9	38%	54%	5
B	LNF	KO	AB	NOX	kg/TJ	853.4	44%	43%	5
B	LNF	KO	AO	CH4	kg/TJ	13.1	60%	110%	5
B	LNF	KO	AO	N2O	kg/TJ	0.0	74%	173%	5
B	LNF	KO	AO	NMVOG	kg/TJ	374.2	61%	112%	5
B	LNF	KO	AO	NOX	kg/TJ	884.8	49%	49%	5
B	LNF	KO	IO	CH4	kg/TJ	31.8	58%	104%	5
B	LNF	KO	IO	N2O	kg/TJ	0.0	75%	170%	5
B	LNF	KO	IO	NMVOG	kg/TJ	604.5	59%	103%	5
B	LNF	KO	IO	NOX	kg/TJ	458.3	48%	47%	5
B	LNF	KO	VD	NMVOG	kg/t	14.9	57%	100%	5
B	LNF	MT	AB	CH4	kg/TJ	7.7	71%	72%	5
B	LNF	MT	AB	N2O	kg/TJ	0.8	73%	169%	5
B	LNF	MT	AB	NMVOG	kg/TJ	26.6	72%	70%	5
B	LNF	MT	AB	NOX	kg/TJ	181.5	90%	88%	5
B	LNF	MT	AO	CH4	kg/TJ	5.6	65%	66%	5
B	LNF	MT	AO	N2O	kg/TJ	1.9	74%	176%	5
B	LNF	MT	AO	NMVOG	kg/TJ	19.3	61%	61%	5
B	LNF	MT	AO	NOX	kg/TJ	121.6	56%	57%	5
B	LNF	MT	IO	CH4	kg/TJ	8.1	70%	72%	5
B	LNF	MT	IO	N2O	kg/TJ	3.1	75%	173%	5
B	LNF	MT	IO	NMVOG	kg/TJ	108.7	66%	66%	5
B	LNF	MT	IO	NOX	kg/TJ	169.0	49%	50%	5
B	LNF	MT	VD	NMVOG	kg/t	0.7	67%	66%	5
B	KKR	KO	IO	CH4	kg/TJ	232.3	58%	99%	5
B	KKR	KO	IO	N2O	kg/TJ	1.0	74%	167%	5
B	KKR	KO	IO	NMVOG	kg/TJ	2726.7	58%	107%	5
B	KKR	KO	IO	NOX	kg/TJ	27.6	47%	48%	5
B	KKR	KO	VD	NMVOG	kg/t	13.7	58%	100%	5
B	KR	KO	AB	CH4	kg/TJ	54.0	38%	53%	5
B	KR	KO	AB	N2O	kg/TJ	0.6	76%	175%	5
B	KR	KO	AB	NMVOG	kg/TJ	969.4	38%	54%	5
B	KR	KO	AB	NOX	kg/TJ	252.8	44%	44%	5
B	KR	KO	AO	CH4	kg/TJ	61.6	59%	109%	5
B	KR	KO	AO	N2O	kg/TJ	0.7	76%	171%	5
B	KR	KO	AO	NMVOG	kg/TJ	1129.1	60%	106%	5
B	KR	KO	AO	NOX	kg/TJ	185.6	50%	49%	5
B	KR	KO	IO	CH4	kg/TJ	74.9	58%	102%	5
B	KR	KO	IO	N2O	kg/TJ	0.6	76%	171%	5
B	KR	KO	IO	NMVOG	kg/TJ	1430.6	58%	104%	5
B	KR	KO	IO	NOX	kg/TJ	73.0	47%	46%	5
B	KR	KO	VD	NMVOG	kg/t	29.8	58%	99%	5
B	KR	MT	AB	CH4	kg/TJ	28.7	71%	72%	5
B	KR	MT	AB	N2O	kg/TJ	0.7	74%	172%	5
B	KR	MT	AB	NMVOG	kg/TJ	373.0	71%	73%	5
B	KR	MT	AB	NOX	kg/TJ	378.2	90%	92%	5
B	KR	MT	AO	CH4	kg/TJ	30.6	66%	65%	5
B	KR	MT	AO	N2O	kg/TJ	0.8	75%	174%	5
B	KR	MT	AO	NMVOG	kg/TJ	404.7	62%	61%	5
B	KR	MT	AO	NOX	kg/TJ	258.3	56%	55%	5
B	KR	MT	IO	CH4	kg/TJ	38.2	71%	70%	5
B	KR	MT	IO	N2O	kg/TJ	0.7	75%	167%	5

Energie	Fz.kat.	Technik	Str.kat	Schadstoff	Einheit	EF			Ebene
B	KR	MT	IO	NMVOC	kg/TJ	499.3	66%	66%	5
B	KR	MT	IO	NOX	kg/TJ	103.3	49%	49%	5
B	KR	MT	VD	NMVOC	kg/t	25.9	66%	66%	5
D	PKW+	KO	AB	CH4	kg/TJ	0.4	28%	35%	5
D	PKW+	KO	AB	N2O	kg/TJ	0.0	56%	94%	5
D	PKW+	KO	AB	NMVOC	kg/TJ	15.6	28%	35%	5
D	PKW+	KO	AB	NOX	kg/TJ	235.8	28%	28%	5
D	PKW+	KO	AO	CH4	kg/TJ	0.6	31%	40%	5
D	PKW+	KO	AO	N2O	kg/TJ	0.0	56%	97%	5
D	PKW+	KO	AO	NMVOC	kg/TJ	22.8	31%	40%	5
D	PKW+	KO	AO	NOX	kg/TJ	230.2	28%	28%	5
D	PKW+	KO	IO	CH4	kg/TJ	1.3	31%	40%	5
D	PKW+	KO	IO	N2O	kg/TJ	0.0	56%	97%	5
D	PKW+	KO	IO	NMVOC	kg/TJ	51.6	24%	28%	5
D	PKW+	KO	IO	NOX	kg/TJ	217.5	35%	35%	5
D	PKW+	MT	AB	CH4	kg/TJ	0.3	41%	42%	5
D	PKW+	MT	AB	N2O	kg/TJ	1.6	55%	96%	5
D	PKW+	MT	AB	NMVOC	kg/TJ	11.2	41%	41%	5
D	PKW+	MT	AB	NOX	kg/TJ	222.3	25%	26%	5
D	PKW+	MT	AO	CH4	kg/TJ	0.3	37%	36%	5
D	PKW+	MT	AO	N2O	kg/TJ	2.3	55%	94%	5
D	PKW+	MT	AO	NMVOC	kg/TJ	12.2	42%	41%	5
D	PKW+	MT	AO	NOX	kg/TJ	205.4	13%	13%	5
D	PKW+	MT	IO	CH4	kg/TJ	1.1	42%	42%	5
D	PKW+	MT	IO	N2O	kg/TJ	3.1	55%	93%	5
D	PKW+	MT	IO	NMVOC	kg/TJ	43.9	42%	42%	5
D	PKW+	MT	IO	NOX	kg/TJ	180.2	13%	13%	5
B	PKW+	KO	AB	CH4	kg/TJ	9.1	39%	53%	5
B	PKW+	KO	AB	N2O	kg/TJ	0.0	74%	177%	5
B	PKW+	KO	AB	NMVOC	kg/TJ	262.0	38%	55%	5
B	PKW+	KO	AB	NOX	kg/TJ	757.1	43%	43%	5
B	PKW+	KO	AO	CH4	kg/TJ	13.3	60%	107%	5
B	PKW+	KO	AO	N2O	kg/TJ	0.0	75%	180%	5
B	PKW+	KO	AO	NMVOC	kg/TJ	381.1	60%	108%	5
B	PKW+	KO	AO	NOX	kg/TJ	750.4	49%	49%	5
B	PKW+	KO	IO	CH4	kg/TJ	50.2	58%	101%	5
B	PKW+	KO	IO	N2O	kg/TJ	0.0	73%	169%	5
B	PKW+	KO	IO	NMVOC	kg/TJ	689.0	57%	100%	5
B	PKW+	KO	IO	NOX	kg/TJ	344.7	48%	47%	5
B	PKW+	KO	VD	NMVOC	kg/t	28.4	58%	101%	5
B	PKW+	MT	AB	CH4	kg/TJ	3.5	72%	72%	5
B	PKW+	MT	AB	N2O	kg/TJ	0.7	75%	170%	5
B	PKW+	MT	AB	NMVOC	kg/TJ	12.2	72%	71%	5
B	PKW+	MT	AB	NOX	kg/TJ	81.3	90%	91%	5
B	PKW+	MT	AO	CH4	kg/TJ	2.9	65%	66%	5
B	PKW+	MT	AO	N2O	kg/TJ	1.9	74%	181%	5
B	PKW+	MT	AO	NMVOC	kg/TJ	10.2	60%	60%	5
B	PKW+	MT	AO	NOX	kg/TJ	64.3	55%	54%	5
B	PKW+	MT	IO	CH4	kg/TJ	5.8	70%	70%	5
B	PKW+	MT	IO	N2O	kg/TJ	2.6	74%	166%	5
B	PKW+	MT	IO	NMVOC	kg/TJ	96.6	67%	66%	5
B	PKW+	MT	IO	NOX	kg/TJ	72.9	50%	49%	5
B	PKW+	MT	VD	NMVOC	kg/t	1.1	66%	65%	5
D	SNF+	KO	AB	CH4	kg/TJ	2.4	26%	26%	5

Energie	Fz.kat.	Technik	Str.kat	Schadstoff	Einheit	EF			Ebene
D	SNF+	KO	AB	N2O	kg/TJ	1.4	37%	52%	5
D	SNF+	KO	AB	NMVOG	kg/TJ	98.2	26%	27%	5
D	SNF+	KO	AB	NOX	kg/TJ	972.1	19%	19%	5
D	SNF+	KO	AO	CH4	kg/TJ	2.4	26%	26%	5
D	SNF+	KO	AO	N2O	kg/TJ	2.0	37%	50%	5
D	SNF+	KO	AO	NMVOG	kg/TJ	96.7	27%	26%	5
D	SNF+	KO	AO	NOX	kg/TJ	1014.8	19%	19%	5
D	SNF+	KO	IO	CH4	kg/TJ	4.8	27%	27%	5
D	SNF+	KO	IO	N2O	kg/TJ	1.9	37%	50%	5
D	SNF+	KO	IO	NMVOG	kg/TJ	195.7	27%	26%	5
D	SNF+	KO	IO	NOX	kg/TJ	921.7	19%	20%	5
D	SNF+	MT	AB	CH4	kg/TJ	0.8	25%	26%	5
D	SNF+	MT	AB	N2O	kg/TJ	0.6	37%	50%	5
D	SNF+	MT	AB	NMVOG	kg/TJ	30.8	25%	25%	5
D	SNF+	MT	AB	NOX	kg/TJ	570.1	12%	12%	5
D	SNF+	MT	AO	CH4	kg/TJ	0.7	25%	25%	5
D	SNF+	MT	AO	N2O	kg/TJ	1.1	36%	50%	5
D	SNF+	MT	AO	NMVOG	kg/TJ	29.0	25%	26%	5
D	SNF+	MT	AO	NOX	kg/TJ	646.0	12%	12%	5
D	SNF+	MT	IO	CH4	kg/TJ	1.3	25%	25%	5
D	SNF+	MT	IO	N2O	kg/TJ	1.1	37%	51%	5
D	SNF+	MT	IO	NMVOG	kg/TJ	51.6	25%	25%	5
D	SNF+	MT	IO	NOX	kg/TJ	715.0	12%	11%	5
D	BUS	KO	alle	CH4	kg/TJ	2.2	44%	65%	4
D	BUS	KO	alle	N2O	kg/TJ	1.1	38%	58%	4
D	BUS	KO	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	88.5	44%	65%	4
D	BUS	KO	alle	NOX	kg/TJ	1018.0	38%	59%	4
D	BUS	MT	alle	CH4	kg/TJ	1.0	29%	38%	4
D	BUS	MT	alle	N2O	kg/TJ	0.9	26%	34%	4
D	BUS	MT	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	39.6	30%	38%	4
D	BUS	MT	alle	NOX	kg/TJ	720.4	26%	34%	4
D	LNF	KO	alle	CH4	kg/TJ	1.1	36%	61%	4
D	LNF	KO	alle	N2O	kg/TJ	0.0	56%	81%	4
D	LNF	KO	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	43.1	53%	79%	4
D	LNF	KO	alle	NOX	kg/TJ	282.4	41%	65%	4
D	LNF	MT	alle	CH4	kg/TJ	0.5	48%	56%	4
D	LNF	MT	alle	N2O	kg/TJ	1.5	48%	59%	4
D	LNF	MT	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	20.3	48%	58%	4
D	LNF	MT	alle	NOX	kg/TJ	289.6	29%	38%	4
B	LNF	KO	alle	CH4	kg/TJ	21.2	60%	85%	4
B	LNF	KO	alle	N2O	kg/TJ	0.0	62%	87%	4
B	LNF	KO	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	456.6	54%	78%	4
B	LNF	KO	alle	NOX	kg/TJ	663.3	43%	68%	4
B	LNF	MT	alle	CH4	kg/TJ	7.5	53%	62%	4
B	LNF	MT	alle	N2O	kg/TJ	2.2	58%	67%	4
B	LNF	MT	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	66.6	66%	75%	4
B	LNF	MT	alle	NOX	kg/TJ	162.9	48%	57%	4
B	KKR	KO	alle	CH4	kg/TJ	232.3	79%	206%	4
B	KKR	KO	alle	N2O	kg/TJ	1.0	75%	199%	4
B	KKR	KO	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	2726.7	80%	198%	4
B	KKR	KO	alle	NOX	kg/TJ	27.6	81%	200%	4
B	KR	KO	alle	CH4	kg/TJ	65.1	42%	59%	4
B	KR	KO	alle	N2O	kg/TJ	0.7	40%	58%	4

Energie	Fz.kat.	Technik	Str.kat	Schadstoff	Einheit	EF			Ebene
B	KR	KO	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	1209.4	42%	59%	4
B	KR	KO	alle	NOX	kg/TJ	156.5	46%	64%	4
B	KR	MT	alle	CH4	kg/TJ	33.0	49%	56%	4
B	KR	MT	alle	N2O	kg/TJ	0.8	49%	55%	4
B	KR	MT	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	433.6	47%	53%	4
B	KR	MT	alle	NOX	kg/TJ	218.6	45%	53%	4
D	PKW+	KO	alle	CH4	kg/TJ	0.8	47%	70%	4
D	PKW+	KO	alle	N2O	kg/TJ	0.0	40%	61%	4
D	PKW+	KO	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	30.7	45%	67%	4
D	PKW+	KO	alle	NOX	kg/TJ	227.4	40%	60%	4
D	PKW+	MT	alle	CH4	kg/TJ	0.5	42%	49%	4
D	PKW+	MT	alle	N2O	kg/TJ	2.3	31%	39%	4
D	PKW+	MT	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	22.2	42%	49%	4
D	PKW+	MT	alle	NOX	kg/TJ	203.0	26%	34%	4
B	PKW+	KO	alle	CH4	kg/TJ	27.1	59%	76%	4
B	PKW+	KO	alle	N2O	kg/TJ	0.0	50%	67%	4
B	PKW+	KO	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	475.9	50%	70%	4
B	PKW+	KO	alle	NOX	kg/TJ	588.7	41%	60%	4
B	PKW+	MT	alle	CH4	kg/TJ	4.1	50%	56%	4
B	PKW+	MT	alle	N2O	kg/TJ	1.8	47%	55%	4
B	PKW+	MT	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	41.3	66%	73%	4
B	PKW+	MT	alle	NOX	kg/TJ	72.7	45%	52%	4
D	SNF+	KO	alle	CH4	kg/TJ	3.2	28%	33%	4
D	SNF+	KO	alle	N2O	kg/TJ	1.8	21%	26%	4
D	SNF+	KO	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	131.9	28%	33%	4
D	SNF+	KO	alle	NOX	kg/TJ	970.2	22%	27%	4
D	SNF+	MT	alle	CH4	kg/TJ	0.8	23%	26%	4
D	SNF+	MT	alle	N2O	kg/TJ	0.8	17%	21%	4
D	SNF+	MT	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	33.2	23%	26%	4
D	SNF+	MT	alle	NOX	kg/TJ	607.8	18%	21%	4
D	BUS	alle	alle	CH4	kg/TJ	1.2	25%	31%	3
D	BUS	alle	alle	N2O	kg/TJ	1.0	22%	29%	3
D	BUS	alle	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	48.2	26%	32%	3
D	BUS	alle	alle	NOX	kg/TJ	772.4	23%	28%	3
D	LNF	alle	alle	CH4	kg/TJ	0.5	40%	48%	3
D	LNF	alle	alle	N2O	kg/TJ	1.4	48%	57%	3
D	LNF	alle	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	22.4	41%	50%	3
D	LNF	alle	alle	NOX	kg/TJ	289.0	27%	35%	3
B	LNF	alle	alle	CH4	kg/TJ	12.4	42%	49%	3
B	LNF	alle	alle	N2O	kg/TJ	1.4	58%	65%	3
B	LNF	alle	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	207.4	44%	50%	3
B	LNF	alle	alle	NOX	kg/TJ	343.4	33%	40%	3
B	KKR	alle	alle	CH4	kg/TJ	232.3	79%	206%	3
B	KKR	alle	alle	N2O	kg/TJ	1.0	75%	199%	3
B	KKR	alle	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	2726.7	80%	198%	3
B	KKR	alle	alle	NOX	kg/TJ	27.6	81%	200%	3
B	KR	alle	alle	CH4	kg/TJ	49.7	33%	38%	3
B	KR	alle	alle	N2O	kg/TJ	0.7	32%	39%	3
B	KR	alle	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	838.8	33%	39%	3
B	KR	alle	alle	NOX	kg/TJ	186.2	33%	40%	3
D	PKW+	alle	alle	CH4	kg/TJ	0.6	39%	45%	3
D	PKW+	alle	alle	N2O	kg/TJ	2.2	31%	37%	3
D	PKW+	alle	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	22.8	38%	44%	3

Energie	Fz.kat.	Technik	Str.kat	Schadstoff	Einheit	EF			Ebene
D	PKW+	alle	alle	NOX	kg/TJ	204.8	25%	31%	3
B	PKW+	alle	alle	CH4	kg/TJ	4.7	44%	50%	3
B	PKW+	alle	alle	N2O	kg/TJ	1.8	47%	55%	3
B	PKW+	alle	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	51.3	53%	60%	3
B	PKW+	alle	alle	NOX	kg/TJ	84.6	39%	46%	3
D	SNF+	alle	alle	CH4	kg/TJ	0.9	21%	24%	3
D	SNF+	alle	alle	N2O	kg/TJ	0.9	16%	19%	3
D	SNF+	alle	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	37.4	21%	24%	3
D	SNF+	alle	alle	NOX	kg/TJ	623.3	17%	20%	3
B	LNF	VD	alle	NMVOG Verdampfung	kg/t	5.7	72%	96%	3
B	KKR	VD	alle	NMVOG Verdampfung	kg/t	13.7	79%	196%	3
B	KR	VD	alle	NMVOG Verdampfung	kg/t	27.9	56%	89%	3
B	PKW+	VD	alle	NMVOG Verdampfung	kg/t	1.8	58%	91%	3
D	alle	alle	alle	CH4	kg/TJ	0.7	19%	21%	2
D	alle	alle	alle	N2O	kg/TJ	1.5	21%	23%	2
D	alle	alle	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	29.1	19%	21%	2
D	alle	alle	alle	NOX	kg/TJ	390.5	13%	16%	2
B	alle	alle	alle	CH4	kg/TJ	6.7	34%	40%	2
B	alle	alle	alle	N2O	kg/TJ	1.7	47%	53%	2
B	alle	alle	alle	NMVOG Auspuff	kg/TJ	80.7	37%	43%	2
B	alle	alle	alle	NOX	kg/TJ	88.6	36%	43%	2