

Bundesanstalt für Straßenwesen BAST

# Vergleich COPERT – TREMOD

## FE 84.0519/2014

Schlussbericht

Bern, Heidelberg und Thessaloniki, 8. August 2016

Benedikt Notter, Philipp Wüthrich (INFRAS)

Christoph Heidt, Wolfram Knörr (IFEU)

Giorgos Mellios, Giannis Papadimitriou, Charis Kouridis (EMISIA)

## **Impressum**

### **Vergleich COPERT – TREMOD**

FE 84.0519/2014

Schlussbericht

Bern, Heidelberg und Thessaloniki, 8. August 2016

7307a\_COPERT\_TREMOD\_BAST\_Schlussbericht.docx

### **Auftraggeber**

Bundesanstalt für Straßenwesen

### **Projektleitung**

INFRAS, Philipp Wüthrich

### **Autorinnen und Autoren**

Philipp Wüthrich, Benedikt Notter (INFRAS)

Christoph Heidt, Wolfram Knörr (IFEU)

Giorgos Mellios, Giannis Papadimitriou, Charis Kouridis (EMISIA)

### **Kontakt**

INFRAS, Sennweg 2, 3012 Bern

Tel. +41 31 370 19 19

[philipp.wuethrich@infras.ch](mailto:philipp.wuethrich@infras.ch)

In Kooperation mit EMISIA (Thessaloniki, Griechenland) und IFEU (Heidelberg, Deutschland)

## Inhalt

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2.</b>	<b>Vorgehen</b>	<b>9</b>
2.1.	Übersicht	9
2.2.	Modellbeschreibung	10
2.3.	Quantitativer Vergleich der Inputdaten und Modellresultate	10
2.3.1.	Zuordnung der Modellkategorien	10
2.3.2.	Vergleich der verwendeten Inputdaten	12
2.3.3.	Vergleich der Modellresultate	13
2.4.	Vergleich der Modelleignung	15
2.4.1.	Anwendungsfälle	16
2.4.2.	Evaluationskriterien	17
<b>3.</b>	<b>Verkehrsemissionsmodelle in Europa</b>	<b>22</b>
3.1.	Übersicht	22
3.2.	Neben COPERT und TREMOD eingesetzte Modelle	23
3.2.1.	HBEFA	23
3.2.2.	VERSIT+	25
3.2.3.	LIISA	26
3.2.4.	Weitere Modelle	27
<b>4.</b>	<b>Detailbeschreibung COPERT</b>	<b>29</b>
4.1.	Geschichte und Einbettung	29
4.1.1.	Geschichte	29
4.1.2.	Institutionelle Einbettung und Finanzierung	31
4.2.	Modellentwickler	31
4.3.	Nutzer und Anwendungsfelder	31
4.3.1.	Nutzer	31
4.3.2.	Anwendungsfelder	32
4.4.	Systemgrenzen	34
4.4.1.	Verkehrsträger	34
4.4.2.	Fahrzeugkategorien und -technologien	34
4.4.3.	Komponenten	35
4.4.4.	Umweltwirkungen	36
4.4.5.	Räumliche Auflösung	36
4.4.6.	Zeitliche Auflösung	36
4.4.7.	Geografische Abdeckung	36

4.5.	Methodik (Straßenverkehr)	37
4.5.1.	Überblick	37
4.5.2.	Fahrzeugflotte	37
4.5.3.	Verkehrsaktivitäten und andere Parameter	38
4.5.4.	Energieverbrauch	39
4.5.5.	Emissionsfaktoren	40
4.5.6.	Emissionsberechnung	44
4.5.7.	Modellresultate/Outputs	44
4.6.	Eingangsdaten und Quellen	45
4.7.	Operationelle Aspekte	46
4.8.	Zugang, Publikation und Dokumentation	46
<b>5.</b>	<b>Detailbeschreibung TREMOD</b>	<b>47</b>
5.1.	Geschichte und Einbettung	47
5.1.1.	Geschichte	47
5.1.2.	Institutionelle Einbettung und Finanzierung	47
5.2.	Modellentwickler	48
5.3.	Nutzer und Anwendungsfelder	48
5.3.1.	Nutzer	48
5.3.2.	Anwendungsfelder	49
5.4.	Systemgrenzen	51
5.4.1.	Verkehrsträger	51
5.4.2.	Fahrzeugkategorien und -technologien	52
5.4.3.	Komponenten	54
5.4.4.	Umweltwirkungen	55
5.4.5.	Räumliche Auflösung	55
5.4.6.	Zeitliche Auflösung	55
5.4.7.	Geografische Abdeckung	56
5.5.	Methodik (Straßenverkehr)	56
5.5.1.	Überblick	56
5.5.2.	Fahrzeugflotte	57
5.5.3.	Verkehrsaktivitäten und andere Parameter	60
5.5.4.	Energieverbrauch	65
5.5.5.	Emissionsfaktoren	71
5.5.6.	Emissionsberechnung	75
5.5.7.	Modellresultate/Outputs	76
5.6.	Eingangsdaten und Quellen	78

5.6.1.	Flottenzusammensetzung	78
5.6.2.	Fahrleistungen	78
5.6.3.	Spezifischer Energieverbrauch	81
5.6.4.	Gesamter Energieverbrauch, Kraftstoffbilanz	81
5.6.5.	Emissionsfaktoren	82
5.7.	Operationelle Aspekte	82
5.8.	Zugang, Publikation und Dokumentation	83
5.9.	Weitere Aspekte	84
<b>6.</b>	<b>Vergleich der verwendeten Inputdaten</b>	<b>85</b>
6.1.	Aktivitätsdaten (AD; Verkehrsmengengerüste)	85
6.1.1.	Ex-Post (Zeitraum 2000-2013)	85
6.1.2.	Trendszenario (Zeitraum 2014-2030)	93
6.2.	Emissionsfaktoren	97
6.2.1.	Allgemeine Unterschiede	97
6.2.2.	Kraftstoffverbrauch und CO <sub>2</sub>	99
6.2.3.	Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	100
6.2.4.	Partikel (PM10, abgasbedingt)	102
6.2.5.	Kohlenwasserstoffe (HC)	102
<b>7.</b>	<b>Vergleich der Modellresultate</b>	<b>104</b>
7.1.	Resultate unter Verwendung originaler Aktivitätsdaten	104
7.1.1.	Übersicht	104
7.1.2.	Kraftstoffverbrauch und CO <sub>2</sub>	106
7.1.3.	Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	107
7.1.4.	Partikel (PM10, abgasbedingt)	108
7.1.5.	Kohlenwasserstoffe (HC)	109
7.2.	Resultate bei Verwendung gleicher Aktivitätsdaten	110
7.2.1.	Übersicht	110
7.2.2.	Kraftstoffverbrauch und CO <sub>2</sub>	113
7.2.3.	Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	115
7.2.4.	Partikel (PM10, abgasbedingt)	117
7.2.5.	Kohlenwasserstoffe (HC)	119
7.3.	Sensitivitätsanalyse	120
7.3.1.	COPERT: Verwendung der Durchschnittsgeschwindigkeiten der TREMOD-Verkehrssituationen	120
7.3.2.	TREMOD: Verdopplung des Stop&Go- und Saturated-Anteils	124
7.4.	Fazit der Vergleichsrechnungen	128

<b>8.</b>	<b>Vergleich der Modelleignung</b>	<b>130</b>
8.1.	Übersicht	130
8.2.	Nutzen-Kriterien	132
8.2.1.	Genauigkeit der Resultate	132
8.2.2.	Anwendbarkeit	136
8.3.	Kosten-Kriterien	139
8.3.1.	Modellkosten	139
8.3.2.	Kosten der Aktivitätsdaten	139
8.3.3.	Aufwand für Modellanwendung	140
8.4.	Weitere Kriterien	140
8.4.1.	Zukunftsfähigkeit	140
8.4.2.	Kommunikation	142
8.5.	Fazit des Modelleignungsvergleichs	142
<b>9.</b>	<b>Gesamtfazit</b>	<b>146</b>
<b>Anhang 148</b>		
A1.	Kurzübersichten Verkehrsemissionsmodelle	148
A2.	Eingangsdaten und Modellergebnisse	154
A2.1.	Originale Aktivitätsdaten	154
A2.1.1.	Fahrleistungen, 2000-2013	154
A2.1.2.	Bestand, 2000-2013	156
A2.1.3.	Starts/Stopps, 2000-2013	157
A2.1.4.	Fahrleistungen PKW, 2014-2030	159
A2.1.5.	Bestand PKW, 2014-2030	159
A2.2.	Modellergebnisse bei Verwendung der originalen Aktivitätsdaten	160
A2.3.	Modellergebnisse bei Verwendung gleicher Aktivitätsdaten	168
	<b>Glossar</b>	<b>171</b>
	<b>Literatur</b>	<b>174</b>

## 1. Einleitung

Zur Ermittlung der Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland wurde Anfang der 1990er Jahre im Auftrag des Umweltbundesamtes vom IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH) das „Transport Emission Model“ (TREMODO) entwickelt. In die Entstehung des Modells flossen die Ergebnisse verschiedener F&E-Projekte des Umweltbundesamtes, beispielsweise Studien des TÜV Rheinland zum Emissionsverhalten der Straßenfahrzeuge sowie Untersuchungen von Heusch-Boesefeldt und vom Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung (IVT) zum Fahrverhalten und den Fahrleistungen, mit ein. Die von TREMOD genutzten Emissionsfaktoren für Krafträder, Pkw, LNF, Lkw und Busse entstammen dabei dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA). Das deutsche Umweltministerium und das Umweltbundesamt haben TREMOD von Anfang an so konzipiert, dass es beim Straßenverkehr direkt auf dem HBEFA aufbaut. Damit sind TREMOD und HBEFA in Deutschland als eine Einheit zu sehen, die sich gegenseitig ergänzen und die Emissionsberechnung des Straßenverkehrs vom Street Level bis zum Inventory mit der gleichen Methodik und den gleichen Daten (sowohl bei den Aktivitäts- als auch bei den Emissionsdaten) ermöglichen. Dieses Zusammenspiel ist ein wesentlicher Faktor für die Akzeptanz der beiden Modelle in Deutschland bei allen Akteuren, vom Ingenieurbüro, das Immissionsberechnungen vornimmt, bis zum Industrie- oder Verkehrsverband, wie auch von der Kommune bis zum Bundesministerium. Heute wird die Weiterentwicklung des Modells nicht nur durch das Umweltbundesamt, sondern auch von der Bundesanstalt für Straßenwesen finanziert. TREMOD deckt dabei neben dem Straßenverkehr (Personen- und Güterverkehr) auch den Bahn-, Binnenschiffs- und Luftverkehr ab. Mit TREMOD-MM gibt es zudem ein ergänzendes Modell, das die Emissionen des Non-Road-Bereiches (Baumaschinen, Landwirtschaft etc.) ermittelt. Die Ergebnisse von TREMOD werden von Deutschland verwendet, um seinen internationalen Verpflichtungen zur Berichterstattung im Rahmen der Genfer Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigungen der UN/ECE sowie des Kyoto-Protokolls über die Reduktion der Treibhausgasemissionen nachzukommen. TREMOD wird außer von staatlichen Institutionen auch von privatwirtschaftlichen Akteuren genutzt (u.a. der Deutschen Bahn AG, Allianz pro Schiene, Verband der Automobilindustrie). Zudem fließen die Daten von TREMOD in viele Ökobilanzdatenbanken (z.B. Ecoinvent, GEMIS) oder Tools zum Emissionsvergleich von Verkehrsträgern ein (z.B. EcoPassenger, EcoTransIT).

Die Verwendung eines Emissionsmodells ist zur Ermittlung der Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen des Verkehrs zwingend erforderlich. Zwar können basierend auf den in einem Land verbrauchten Kraftstoffmengen historisch die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs ermit-

telt werden. Eine Differenzierung nach Verursachern (z.B. Pkw- und Lkw-Verkehr), die Berechnung von übrigen Treibhausgas- (z.B. CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O) und Luftschadstoffemissionen (z.B. NO<sub>x</sub>, NMHC, PM) ebenso wie Szenariorechnungen zur zukünftigen Entwicklung der Emissionen sind ohne Verkehrsemissionsmodelle aber nicht möglich. Aus diesem Grund nutzen in Europa nahezu alle Länder entsprechende Modelle.

Andere europäische Länder nutzen andere Emissionsmodelle, wie HBEFA, VERSIT+ oder COPERT. Am weitesten verbreitet sind COPERT („Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport“) und darauf aufbauende Modelle. COPERT wird von dem Laboratory of Applied Thermodynamics der Aristotle University of Thessaloniki (LAT) und von EMISIA (ein Spin-off-Unternehmen von LAT) erstellt und weiter entwickelt. Analog zu TREMOD dient COPERT in erster Linie der Erstellung nationaler Verkehrsemissionsinventare, deckt aber im Gegensatz zu TREMOD ausschließlich den Straßenverkehr ab. Im Vergleich zu TREMOD steht das Modell öffentlich für Nutzer zur Verfügung, länderspezifische Datensätze können kostenpflichtig dazugekauft werden. Wie TREMOD greift auch COPERT auf die Emissionsfaktoren von HBEFA zurück. Methodisch unterscheiden die beiden Modelle sich jedoch, indem sie namentlich unterschiedliche Ansätze in der Implementierung der HBEFA-Emissionsfaktoren verfolgen.

Es ist derzeit nicht klar, welches Emissionsmodell für welche Aspekte der Emissionsberechnung am besten geeignet ist. Aus diesem Grund erfolgt im vorliegenden Forschungsvorhaben (FE 84.0519/2014) eine kritische Prüfung der Modelle COPERT und TREMOD. Ziel ist es, eine Bewertung hinsichtlich der Verwendung bzw. der Verwendbarkeit der beiden Rechenmodelle für verschiedene Aspekte der Emissionsberechnung u.a. auf der Basis von Vergleichsrechnungen durchzuführen.



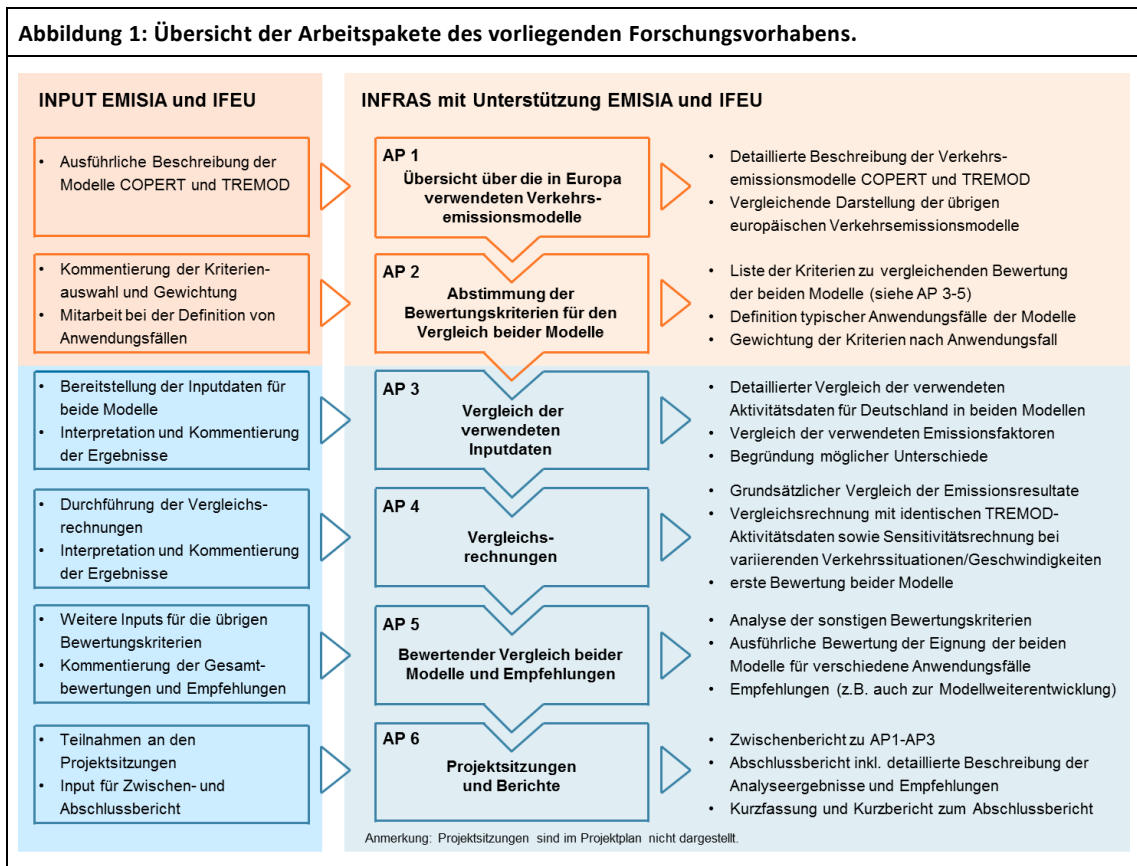
## 2. Vorgehen

### 2.1. Übersicht

Das Vorgehen für das vorliegende Forschungsvorhaben gliedert sich grob in drei Teile, welche in 6 Arbeitspaketen (AP) abgearbeitet wurden (vgl. Abbildung 1):

- Einen beschreibenden Teil, in dem Methodik, Inputdaten, Geschichte, institutionelle Einbettung der beiden Modelle COPERT und TREMOD (sowie zur Übersicht für andere europäische Straßenverkehrs-Emissionsmodelle) zusammengestellt und beschrieben werden. Dieser Teil entspricht Arbeitspaket (AP) 1 des Forschungsvorhabens in Abbildung 1. Die Resultate werden in Kapitel 3 bis 5 des vorliegenden Berichts präsentiert.
- Einen rechnerischen Teil, in dem Eingangsdaten sowie Modellresultate beider Modelle systematisch quantitativ verglichen werden. Dieser Teil entspricht AP 3 und 4 in Abbildung 1. Die Resultate finden sich in Kapitel 6 und 7 des Berichtes.
- Einen Evaluationsteil, in dem die beiden Modelle hinsichtlich ihrer Eignung für typische Anwendungsfälle verglichen werden. In diesen Vergleich fließen die Erkenntnisse der beiden ersten Teile ein. Er entspricht AP 2 und 5 in Abbildung 1. Die Resultate des Eignungsvergleichs werden in Kapitel 8 präsentiert.

Die folgenden Unterkapitel beschreiben das Vorgehen für jeden der drei Teile im Detail.



Orange hinterlegt: Inhalt des Zwischenberichts

## 2.2. Modellbeschreibung

Die Modellbeschreibungen (Kapitel 4 und 5) wurden für COPERT und TREMOD von den jeweiligen Entwicklern nach einer von INFRAS vorgegebenen, für beide Modelle gleichen Struktur verfasst, d.h. von der Firma EMISIA für COPERT, und vom Institut für Energie und Umwelt (IFEU) für TREMOD.

Die Beschreibungen der weiteren in Europa verwendeten Straßenverkehrsemissionsmodelle (Kapitel 3) basiert auf öffentlich zugänglichen Informationen, d.h. Websites, technischen Dokumentationen und wissenschaftlichen Publikationen.

## 2.3. Quantitativer Vergleich der Inputdaten und Modellresultate

### 2.3.1. Zuordnung der Modellkategorien

Um Eingangsdaten und Resultate der beiden Modelle COPERT und TREMOD vergleichen zu können, müssen die von den Modellen verwendeten Kategorisierungen in Einklang gebracht werden. Dies betrifft die folgenden Unterteilungen:

- Fahrzeugschichten
- Straßentypen
- Schadstoffe
- Emissionsarten

Die Zuordnung der Fahrzeugschichten ist am komplexesten, da dort die meisten Kategorien bestehen und sich deren Abgrenzungen z.T. an unterschiedlichen Kriterien orientieren. Bei den restlichen Kategorienarten handelt es sich um kurze Listen mit klaren Zuordnungen.

Grundsätzlich muss bei der Zuordnung der Kategorien das kleinste gemeinsame Vielfache gesucht werden; die Modelleingangsdaten oder –Resultate müssen also auf der niedrigsten bei den Modellen gemeinsamen Aggregationsstufe verknüpft werden. Wenn also beispielsweise TREMOD Euro-4-Diesel-PKW mit und ohne Partikelfilter unterscheidet, so müssen deren Emissionen summiert werden, um mit den nicht weiter differenzierten Emissionen der Euro-4-Diesel-PKW von COPERT verglichen werden zu können.

Umgesetzt wurde dieser Grundsatz durch Allokationstabellen, in denen eine Spalte die TREMOD-Kategorien enthält, eine zweite die COPERT-Kategorien, und eine dritte die gemeinsame gleichwertige oder übergeordnete Kategorie.

### **Fahrzeugschichten**

Die Zuordnung der Fahrzeugschichten ist wie bereits erwähnt die komplexeste; eine Fahrzeugschicht ist definiert durch Fahrzeugkategorie (PKW, LNF, SNF, Bus, Kraftrad), ggf. Subkategorie (z.B. Moped oder Motorrad), Kraftstoff bzw. Motorart (Ottomotor, Dieselmotor etc.), Emissionsstandard (Euro-Stufe, also Euro-1, Euro-2 etc.) und ggf. Abgas-Nachbehandlungstechnologie (EGR, SRC, Dieselpartikelfilter). Die Allokationstabelle umfasst mit allen vorkommenden Kombinationen 550 Zeilen.

Viele Kategorien können klar durch eine 1:1- oder 1:n-Beziehung der gemeinsamen Kategorie zugeordnet werden. Speziell erwähnenswert ist die Zuordnung für die folgenden Fahrzeugschichten:

- Größenklassen der PKW: In COPERT, wie früher auch in TREMOD, wurden Hubraumklassen unterschieden. TREMOD stellte aber mit der Version 5.53 für Bezugsjahre ab 2006 auf Kaufsegmente um und unterscheidet daher die drei Größenklassen „klein“, „mittel“ und „groß“. In diesem Bericht wird vereinfachend die Hubraumklasse „<1,4 l“ der Größenklasse „klein“, die Hubraumklasse „1,4 – 2 l“ der Größenklasse „mittel“ und die Hubraumklasse „> 2 l“ der Größenklasse „groß“ zugeordnet. Eine Ausnahme sind die kleinen Diesel-PKW bis Euro-3 – diese werden der Hubraumklasse „1,4 – 2 l“ zugeordnet, da COPERT kleine Diesel-PKW erst ab Euro-4 berücksichtigt.

- In COPERT nicht vorkommende Fahrzeugschichten, wie elektrische Antriebe und Plug-In-Hybride: Für diese fehlt die COPERT-Entsprechung auf der Ebene der Fahrzeugschicht (also keine Zuordnung). Die entsprechende TREMOD-Fahrzeugschicht wird aber bei Aggregationen (Gesamt-Emissionen oder –Fahrleistungen) nicht ausgeschlossen. Diese Fahrzeugschichten sind primär für die Zukunftsszenarien von 2014-2030 relevant.
- Alternative Antriebe bei LNF und Bussen: Diesel-/benzinelektrische Hybride aus TREMOD werden den rein Diesel- respektive benzinbetriebenen LNF aus COPERT zugeordnet. CNG- und LPG-Antriebe bei LNF aus TREMOD werden den benzinbetriebenen LNF aus COPERT zugeordnet.

### **Straßentypen**

COPERT unterscheidet die drei Straßentypen Innerorts (Urban), Außerorts (Rural) und Autobahn (Highway/Motorway). TREMOD unterscheidet ebenfalls diese drei Typen, unterteilt aber die Außerorts-Straßen weiter nach administrativer Zuständigkeit (Gemeinde, Kreis, Land, Bund) und die Autobahnen nach Anzahl Fahrspuren (bis fünf, respektive sechs und mehr).

### **Emissionsarten**

Die Klassierung der Emissionsarten (betriebswarm, Kaltstart, drei Verdampfungsprozesse) ist bei beiden Modellen gleich und führt daher zu einer simplen 1:1-Zuordnung.

### **Schadstoffe**

Auch bei den in diesem Bericht betrachteten Schadstoffen kann eine 1:1-Zuordnung vorgenommen werden – außer beim PM<sub>10</sub>. Hier entsprechen die „Partikel“ von TREMOD nur dem PM-exhaust, also dem abgasbedingten PM<sub>10</sub> von COPERT. Das in COPERT ebenfalls enthaltene PM-nonexhaust wird ausgeschlossen.

## **2.3.2. Vergleich der verwendeten Inputdaten**

Der Vergleich der verwendeten Inputdaten umfasst:

- Aktivitätsdaten (Bestände, Fahrleistungen, Start- & Stoppvorgänge; auch als „Verkehrsmengengerüst“ bezeichnet)
- Emissionsfaktoren

Für den Vergleich der **Aktivitätsdaten** werden die (statistischen) Ex-Post-Daten der Jahre 2000 – 2013 sowie die in den Szenarien angenommenen Aktivitäten für 2014 – 2030 unterschieden.

Für die Ex-Post-Daten liegen für beide Modelle eigene Datensätze für Deutschland vor: Für TREMOD die von den Modellentwicklern auf statistischen Grundlagen erarbeiteten Aktivitätsdaten (Kap. 5.6, IFEU 2012, IFEU 2014), für COPERT der zu großen Teilen auf demjenigen von TREMOD aufbauende, für 300 € käufliche Datensatz, welcher in Kap. 4.6 beschrieben ist.

Prognostizierte Aktivitätsdaten für Deutschland bis 2030 bestehen für TREMOD, liegen jedoch für COPERT nicht offiziell vor. Für den vorliegenden Modellvergleich wurden daher mit dem separaten Modell SIBYL von EMISIA (s. Kap. 4.1) Aktivitätsdaten von PKW bis 2030 für COPERT aufbereitet, auf Basis der gleichen Annahmen zu Neuzulassungen und Überlebenswahrscheinlichkeiten, wie sie für die bestehenden prognostizierten Aktivitätsdaten von TREMOD verwendet wurden. Der Vergleich umfasst dementsprechend nur die Personenwagen-Flotte. Er erlaubt Rückschlüsse zu möglichen Unterschieden in der Methodik der Flottenmodelle von TREMOD und SIBYL.

Der Vergleich der **Emissionsfaktoren** umfasst den Ex-Post-Zeitraum 2000-2013. Die Emissionsfaktoren werden sowohl auf aggregierter Ebene (als „implied emission factors“, d.h. als Resultat der Division der Emissionen durch die entsprechenden Aktivitätsdaten) als auch desaggregiert auf der Subsegment-Ebene verglichen – wobei sich letztere Ebene in den beiden Modellen in ihrem Detaillierungsgrad leicht unterscheidet (s. dazu Kap. 6.2).

Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen werden in der Besprechung zusammengefasst, da sich die beiden Größen nur durch die Multiplikation des Kraftstoffverbrauchs mit zwar nach Kraftstofftyp differenzierten, aber zeitlich nahezu konstanten Emissionsfaktoren unterscheiden.

Der Vergleich des Kraftstoffverbrauchs erfolgt in Energieeinheiten (MJ), da TREMOD auch die Beimischung von Biokraftstoffen berücksichtigt, deren Heizwert (MJ/kg) sich von den fossilen Kraftstoffen unterscheidet. Für die Vergleiche in der vorliegenden Studie wurde der Kraftstoffverbrauch von COPERT unter Verwendung der in HBEFA 3.2 für Deutschland verwendeten, nach Kraftstoffart differenzierten Energiefaktoren in Energieeinheiten umgerechnet. Die Verwendung der Energiefaktoren von HBEFA liegt darin begründet, dass die Kraftstoffverbrauchs-faktoren beider Modelle auf HBEFA basieren; da die Entwickler von TREMOD die Faktoren direkt in MJ/Fzkm aus HBEFA auslesen, ist durch die Anwendung der HBEFA-Energiefaktoren auf die COPERT-Werte sichergestellt, dass die Werte beider Modelle vergleichbar werden.

### 2.3.3. Vergleich der Modellresultate

Die Emissionsresultate der beiden Modelle TREMOD und COPERT werden anhand der folgenden Vergleichsrechnungen evaluiert:

- **Stufe 1:** Auf Basis der originalen Inputdaten jedes Modells. Dieser Vergleich umfasst die Jahre 2000-2013, für die für beide Modelle originale Inputdaten vorliegen (vgl. Kap. 6.1.1). Anhand dieses Vergleichs können die Bereiche identifiziert werden, wo die größten Unterschiede zwischen beiden Modellen auftreten. Zu beachten ist, dass COPERT hier ebenfalls eigene Durchschnittsgeschwindigkeiten verwendet (welche im Allgemeinen tiefer liegen als die in TREMOD aus der Verteilung der Verkehrssituationen resultierenden Durchschnittsgeschwindigkeiten) und dass keine CO<sub>2</sub>-Korrektur (vgl. Kap. 4.5.4) auf die Kraftstoffverbrauchs- und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren appliziert wurde (da auch die Anpassung an die Kraftstoffbilanz ohne diese durchgeführt wurde).
- **Stufe 2:** Vergleich auf Basis gleicher Aktivitätsdaten (und originaler Emissionsfaktoren) jedes Modells. Dafür wurden die Aktivitätsdaten von TREMOD in COPERT importiert. Der Vergleich erfolgt für die Fahrzeugkategorien PKW, LNF und SNF und in Zehnjahresritten zwischen 1990 und 2030. So lassen sich Rückschlüsse auf die modellspezifischen Unterschiede (unabhängig von den Aktivitätsdaten) ziehen. Die COPERT-Rechnung für diesen Schritt enthält die den TREMOD-Aktivitätsdaten entsprechenden Durchschnittsgeschwindigkeiten und die CO<sub>2</sub>-Korrektur wurde auf die Kraftstoffverbrauchs- und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren appliziert.
- **Stufe 3:** Sensitivitätsanalyse der Parameter, durch deren Verwendung sich die beiden Modelle unterscheiden. Wie mehrfach erwähnt, besteht der grundsätzliche Unterschied bei der Ermittlung der Emissionsfaktoren in der Verwendung der Verkehrssituationen für TREMOD bzw. der Durchschnittsgeschwindigkeit für COPERT. Daher werden in dieser Vergleichsrechnung
  - mit COPERT statt mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit für die drei Straßentypen Innerorts, Außerorts und Autobahn die mittleren Geschwindigkeiten der TREMOD-Verkehrssituationen verwendet. Diese Sensitivitätsanalyse zeigt den Einfluss der Desaggregation der Inputs nach statischen Verkehrssituationen auf (eine Differenzierung nach Verkehrsdichtestufen, d.h. nach dem dynamischen Teil der Verkehrssituationen, ist in COPERT nicht möglich).
  - mit TREMOD die Anteile des Stop-and-Go- und Saturated-Verkehrs (also Levels of Service 3 und 4) pro Strassentyp verdoppelt; die Anteile der restlichen Levels of Service werden proportional zu ihrem originalen Anteil verkleinert. Diese Sensitivitätsanalyse zeigt den Einfluss der in TREMOD berücksichtigten Differenzierung nach Levels of Service auf die Emissionen auf. (Beachte: Die PKW mit alternativen Antrieben werden hier nicht berücksichtigt, da der Berechnungsaufwand in keinem Verhältnis zum Erkenntnisgewinn stünde.)

Der Kraftstoffverbrauch wird hier, wie beim Vergleich der Emissionsfaktoren, in Energieeinheiten angegeben (Begründung s. Kap. 2.3.1).

## 2.4. Vergleich der Modelleignung

Die beiden Modelle COPERT und TREMOD werden anhand einer Liste von Kriterien und Indikatoren verglichen (Tabelle 1); die Indikатораusrprägungen werden für typische Anwendungsfälle erhoben und so die relative Eignung beider Modelle nach Anwendungsfall evaluiert. Das Ziel ist nicht eine quantitative, komplett berechenbare Nutzwertanalyse, sondern eine qualitative Beschreibung der Anwendbarkeit und Eignung der beiden Modelle.

<b>Tabelle 1: Übersicht der Kriteriengruppen, Kriterien und Indikatoren für die Modellbewertung.</b>		
<b>Kriteriengruppe</b>	<b>Kriterium</b>	<b>Indikator</b>
Nutzen	Genauigkeit der Resultate	Detaillierungsgrad (Emissionsfaktoren, Aktivitätsdaten)
		Unsicherheit Emissionsfaktoren
		Berücksichtigung der Effizienz des Treibstoffverbrauchs
		Durchgeführte Validierungsstudien
		Vergleich mit Top-Down-Energieverbrauch, ggf. weitere Validierungsoptionen in der Software
	Anwendbarkeit	Detaillierungsgrad (räumlich, zeitlich)
		Für Zukunft anwendbares Flottenmodell
		Verfügbarkeit Emissionsfaktoren
		Berücksichtigung Vorkettenemissionen
		Berücksichtigung Auslastung
Kosten	Modellkosten (inkl. EF)	Beschaffungs- oder Entwicklungskosten des Modells (inkl. Emissionsfaktoren)
		Kosten der Aktivitätsdaten
	Aufwand für Modellanwendung	Zeitaufwand für einen Modellrun
		Knowhow-Anforderungen an Benutzer
Weitere	Zukunftsfähigkeit	Institutionelle Verankerung
		Langfristige Finanzierung
		Nachhaltigkeit der Software-Plattform
		Anzahl Benutzer
	Kommunikation	Verfügbare Publikationen

### 2.4.1. Anwendungsfälle

Für die Evaluation von COPERT und TREMOD wird auf die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Anwendungsfälle fokussiert. Um die Möglichkeiten, aber auch Limitationen der beiden Modelle möglichst vollständig aufzeigen zu können, schließt die Liste bewusst auch Anwendungsfälle mit ein, für welche eines oder beide betrachteten Modelle nicht oder nur beschränkt geeignet sind. Es wird von „idealtypischen“ Anwendungsfällen ausgegangen, während in der Realität natürlich viele Studien Mischformen darstellen.

Die betrachteten Anwendungsfälle sind:

- **Inventare (NIR, IIR):** Berechnung der Straßenverkehrsemissionen für nationale Inventare, welche an internationale Institutionen eingereicht werden müssen, d.h. der NIR („National Inventory Report“, eingereicht an die Rahmenkonvention zum Klimawandel der Vereinten Nationen, UNFCCC) für Treibhausgase, sowie der IIR („Informative Inventory Report“ unter der Konvention, eingereicht an die UNECE-Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung) für Luftschadstoffe. Beide Berichte enthalten auf nationaler Ebene aggregierte Ex-Post-Resultate basierend auf statistischen Daten. Dafür müssen die Bottom-Up modellierten Werte mit den Top-Down-Energiestatistiken zur Übereinstimmung gebracht (bzw. die Differenzen plausibel erklärt) werden. Außerdem müssen alle Berechnungsmethoden detailliert dokumentiert werden.

Da sich die Auswahl der rapportierten Schadstoffe für die beiden Berichte unterscheidet (der NIR fokussiert auf Klimagase und der IIR auf Luftschadstoffe), werden sie als unterschiedliche Anwendungsfälle behandelt.
- **Zukunftsszenarien:** Emissionsmodelle werden oft für die Voraussage der Klimagas- und Luftschadstoffemissionen unter verschiedenen Zukunftsszenarien angewendet. Für solche Anwendungen müssen Inputdaten zur zukünftigen Entwicklung der Fahrzeugflotte, z.B. zur Durchdringung mit neuen Technologien und zu den angenommenen zukünftigen Emissionsfaktoren, vorhanden sein.
- **Verkehrsträgervergleiche:** Diese dienen dem Vergleich der Emissionen verschiedener Verkehrsträger für den gleichen Transportzweck (z.B. Straße vs. Schiene für Personen- oder Güterverkehr). Für einen solchen Vergleich ist ein Modell erforderlich, welches die unterschiedlichen Verkehrsträger beinhaltet – alternativ müssen mehrere Modelle angewendet werden. Die eingesetzten Modelle müssen die Auslastung mit Passagieren oder Ladung berücksichtigen, um zwischen Fahr- und Verkehrsleistung konvertieren zu können. Weiter ist die Berücksichtigung der Vorkettenemissionen von Bedeutung, um die Umweltwirkung unterschiedlicher Energieträger wie Elektrizität und Kraftstoffe vergleichen zu können.



- **Wirkungsabschätzungen:** Die Analyse der Wirkung spezifischer Regulierungen, Fördermaßnahmen oder Infrastrukturprojekte konzentriert sich oft auf Teilbereiche: kleinere geographische Gebiete (Städte, Länder), bestimmte Straßenkategorien (innerorts, Autobahnen) oder Fahrzeugarten (z.B. PKW oder LNF mit bestimmten Antrieben). Daher ist hier der Detaillierungsgrad relevant, sei es bezüglich Fahrzeugschichten, Straßenkategorien oder räumlicher Auflösung (Ebene einzelner Straßenabschnitte).

## 2.4.2. Evaluationskriterien

Ziel der Evaluation ist die Abwägung zwischen Kosten und Nutzen der evaluierten Modelle. Der Nutzen eines Emissionsmodells ist der Gewinn an Grundlagenwissen für die Entscheidungsfindung. Die Kosten beinhalten finanziellen Aufwand und Ressourcen für Beschaffung und Anwendung des Modells. Zusätzlich spielen weitere Kriterien wie Überlegungen zur Langfristigkeit und zur Kommunikation der Modellwahl eine Rolle. Daher werden die Bewertungskriterien in der vorliegenden Studie in folgende **Kriteriengruppen** eingeteilt (vgl. Tabelle 1):

- **Nutzen:** Dazu gehört einerseits die Genauigkeit (bzw. Treffsicherheit) der Modellresultate, andererseits die Anwendbarkeit auf die interessierenden Anwendungsfälle;
- **Kosten:** Dazu gehören die Entwicklungskosten eines Modells (inklusive Herleitung der Emissionsfaktoren) sowie die Kosten der Anwendung (Aufbereitung der Eingangsdaten, Modellrun, Auswertung);
- **Weitere Kriterien:** Dazu gehören weitere Argumente, welche eine Modellwahl unterstützen, wie Langfristigkeit oder Kommunikation (im Sinne von Argumentationsstützen für die Modellwahl).

Jedes Kriterium wird anhand möglichst objektiver, d.h. reproduzierbarer und dokumentierbarer **Indikatoren** bewertet (vgl. Tabelle 1). Viele Indikatoren müssen nach Anwendungsfall differenziert betrachtet werden. Zum Beispiel unterscheidet sich die Anforderung, welche Schadstoffe modelliert werden müssen, zwischen den Anwendungsfällen NIR und IIR (Treibhausgase vs. Luftschadstoffe). Einige Indikatoren sind hingegen unabhängig vom Anwendungsfall – so ist es beispielsweise für alle Anwendungsfälle wünschbar, wenn das verwendete Modell die Effizienz des Kraftstoffverbrauchs berücksichtigt.

In der vorliegenden Studie steht nicht eine quantitative Nutzwertanalyse im Vordergrund. Vielmehr sollen die Unterschiede und Trade-Offs zwischen beiden Modellen qualitativ – d.h. im beschreibenden Sinne – gewürdigt werden. Daher werden die Kriterien und auch nicht gewichtet. Im Zentrum der Beurteilung steht jedoch klar der Nutzen, während Kosten- und weitere Kriterien zwar informativ, aber für die Beurteilung nicht ausschlaggebend sind.

Die nachfolgenden Unterkapitel beschreiben die Operationalisierung der Bewertungskriterien durch Indikatoren.

### 2.4.2.1. Nutzen-Kriterien

#### Genauigkeit

Dieses Kriterium bewertet die Übereinstimmung der modellierten Schätzwerte mit den wahren Werten. Eine bestmögliche Übereinstimmung, also ein korrektes Resultat, ist eines der wichtigsten Ziele der Emissionsmodellierung. Leider kann die Genauigkeit von Emissionsresultaten nicht auf einfache Weise verifiziert werden, da die wahren Gesamt-Emissionen eines Landes nicht gemessen werden können; nur für den Kraftstoffverbrauch existiert ein statistischer Vergleichswert über den Kraftstoffabsatz im Inland, welcher aber auch nur mit Einschränkungen gültig ist (Stichworte Tanktourismus, Non-Road-Bereich). Die Genauigkeit der Modellresultate muss also weitgehend über indirekte Indikatoren beurteilt werden. Die Infos zu diesen Indikatoren stammen zu einem großen Teil aus dem in dieser Studie durchgeführten quantitativen Vergleich der Inputdaten und Resultaten beider Modelle (s. Kapitel 2.3, 6 und 7) und werden ergänzt mit wissenschaftlichen Validierungsstudien und Angaben der Modellentwickler.

Die folgenden Indikatoren werden herangezogen:

- **Detaillierungsgrad (von Emissionsfaktoren und Aktivitätsdaten):** Um die Gesamtemissionen möglichst genau schätzen zu können, müssen alle relevanten Fahrzeugtypen, Technologien, Emissionsarten, Schadstoffe und Straßenkategorien unterschieden werden und Aktivitätsdaten (Fahrleistungen, Bestände, Starts und Stopps) mit den entsprechenden Verbrauchs- und Emissionsfaktoren verknüpft werden. Letztere müssen insbesondere technologische Entwicklungen bei der Schadstoffemissions- und CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung abbilden können. Dieser Indikator ist auf alle Anwendungsfälle anwendbar, die Auswahl der relevanten Fahrzeugschichten ist jedoch je nach Anwendung unterschiedlich.
- **Unsicherheit der Emissionsfaktoren:** Die Unsicherheitsmargen der Verbrauchs- und Emissionsfaktoren schlagen sich direkt im Modellresultat nieder. Untersuchungen der Unsicherheiten wurden sowohl für TREMOD wie für COPERT durchgeführt (z.B. IFEU and INFRAS 2010, EMEP/EEA 2014) und werden für die Evaluation herangezogen. Eigene Unsicherheitsberechnungen wurden im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt. Dieser Indikator wird für alle Anwendungsfälle berücksichtigt, allerdings unterscheidet sich die Relevanz der Unsicherheitsmargen einzelner Schadstoffe nach Anwendungsfall.

Die Unsicherheit der Aktivitätsdaten ist zwar ebenso relevant für die Resultate wie diejenige der Emissionsfaktoren; da jedoch die gleichen Aktivitätsdaten in beide Modelle eingespeist

werden können, ist dieses Entscheidungskriterium von nachrangiger Bedeutung (es kann Unterschiede geben im Detaillierungsgrad, der berücksichtigt werden kann, dies ist aber schon durch den ersten Indikator abgedeckt).

- **Berücksichtigung der Effizienz des Kraftstoffverbrauchs:** Sowohl die EU wie auch andere Länder kennen Vorgaben, wie sich die Effizienz der PKW-Fahrzeugflotte hinsichtlich Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoss verbessern soll (Flottengrenzwerte). Aufgrund dieser nimmt die durchschnittliche Effizienz des Kraftstoffverbrauches mit der Zeit zu. Die Berücksichtigung dieses Effektes ist zentral für die korrekte Modellierung des Kraftstoffverbrauchs; dieser ist wiederum für alle Anwendungsfälle relevant.
- **Durchgeführte Validierungsstudien:** Allenfalls vorhandene wissenschaftliche Publikationen, in denen ein Modell für einen Anwendungsfall getestet und mittels unabhängiger Emissionsdaten (meist Messdaten, wie Immissionsmessungen in Tunneln, entlang Straßen, oder per Remote Sensing) validiert wurde, geben fundierte Hinweise auf die Genauigkeit der Modellresultate.
- **Plausibilisierungshilfen in der Software:** Die Modell-Software kann den Benutzer bei der Plausibilisierung der Resultate unterstützen und somit die Fehlerwahrscheinlichkeit, bedingt durch unplausible Eingaben oder Interpretation, reduzieren. Der automatisierte Abgleich mit nationalen Energiestatistiken ist eine wichtige Möglichkeit, um den modellierten Energieverbrauch zu validieren. Weitere Validierungsoptionen der Software schließen z.B. die Möglichkeit des Vergleichs zwischen Input- und Output-Fahrleistung ein.

### Anwendbarkeit

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Anwendbarkeit eines Modelles auf die relevanten Anwendungsfälle. Hierzu werden die folgenden Indikatoren herangezogen:

- **Räumlicher/zeitlicher Detaillierungsgrad:** Die mögliche räumliche und zeitliche Auflösung beeinflusst die Verwendbarkeit eines Modells v.a. auf subnationaler Ebene (Wirkungsabschätzungen).
- **Für Zukunftsprognosen anwendbares Flottenmodell:** Für Zukunftsszenarien wird ein Flottenmodell, welches Bestand und Fahrleistungen in genügendem Detaillierungsgrad in die Zukunft projiziert, benötigt. Hierbei müssen zum Beispiel Annahmen zu den zukünftig geltenden Emissions- und Effizienzstandards und der Flottenentwicklung durch die Wechselwirkung von Neuzulassungen vs. Außerbetriebsetzungen pro Fahrzeugschicht berücksichtigt werden.
- **Verfügbarkeit von Emissionsfaktoren:** Emissionsfaktoren müssen für alle Schadstoffe und Fahrzeugschichten verfügbar sein, welche von Relevanz oder Interesse sind. Dies kann spezi-

elle Schadstoffe einschließen (z.B. bei einem IIR), oder für Zukunftsszenarien Emissionsfaktoren für zukünftige Emissionsgesetzgebungen und technologische Entwicklungen (soweit vernünftige Annahmen getroffen werden können).

- **Berücksichtigung von Vorkettenemissionen:** Well-to-tank- (WTT-)Emissionen werden v.a. beim Vergleich verschiedener Verkehrsträger und Primärenergiequellen relevant. Ein klassischer Fall ist der Vergleich von Straße und Schiene, wo die Emissionen bei der Produktion der Kraftstoffe bzw. der Elektrizität ins Gewicht fallen. Da Elektrizität als Energieträger auch auf der Straße künftig an Bedeutung gewinnen wird, ist dieser Indikator auch für den Anwendungsfall der Zukunftsszenarien relevant.
- **Berücksichtigung der Auslastung:** Bei den betrachteten Anwendungsfällen ist auch dieser Indikator v.a. für den Verkehrsträgervergleich sowie für Zukunftsszenarien relevant, da die Vorhersagen zur Verkehrsnachfrage meist in Einheiten der Verkehrsleistung (also Personen- oder Tonnenkilometer) vorliegen und mittels Auslastungsziffern in Fahrleistungen (Fahrzeugkilometer) umgerechnet werden müssen.
- **Bereits für Anwendungsfall verwendet:** Wurde ein Modell bereits für einen Anwendungsfall verwendet, ist dies ein starker Hinweis (wenn auch kein Beweis) – im Sinne einer Referenzanwendung – dass es die notwendigen Kriterien der Verwendbarkeit für diesen Fall erfüllt. Unterstützend kann die Anzahl getesteter Anwendungsfälle auch ein Maß für die Plausibilität des Modells für den jeweiligen Anwendungsfall sein.

Die Infos zu diesen Indikatoren stammen aus den Modellbeschreibungen der Entwickler (s. Kapitel 4 und 5) sowie aus den Modelldokumentationen, Publikationen und aus den Erfahrungen beim quantitativen Vergleich der Inputdaten und Resultaten beider Modelle (s. Kapitel 2.3, 6 und 7).

#### 2.4.2.2. Kosten-Kriterien

##### **Modellkosten (inklusive Emissionsfaktoren)**

- **Beschaffungs-/Entwicklungskosten Modell:** Ein Modell kann entweder als frei verfügbares Produkt beschafft werden (wie COPERT), oder ausschließlich für bestimmte Nutzer/Institutionen entwickelt und gepflegt werden (wie TREMOD). In beiden Fällen fallen Kosten an. Zu den reinen Entwicklungskosten des Modells kommen die Kosten für die Erforschung und Aufbereitung der Emissionsfaktoren, da ein Emissionsmodell nur mit aktuellen, möglichst akkuraten Emissionsfaktoren qualitativ hochstehende Resultate erzeugen kann.
- **Kosten der Aktivitätsdaten:** Die Eingangs-Aktivitätsdatensätze müssen für die Verwendung im Emissionsmodell zunächst beschafft und entsprechend aufbereitet werden. Hierbei muss die Summe der Kosten für die Datenbeschaffung und der Zeitaufwand (oder Personalkosten) für die Aufbereitung berücksichtigt werden.

- **Aufwand für die Modellanwendung:** Dieses Kriterium beschreibt die Handhabbarkeit und den wiederkehrenden Aufwand bei jeder Modellanwendung. Die Indikatoren dafür können je nach Anwendungsfall variieren:
  - **Zeitaufwand für einen Modellrun:** Schätzwerte für diesen Indikator wurden von den Modellentwicklern zur Verfügung gestellt.
  - **Knowhow-Anforderungen an Benutzer:** Die notwendige Vorbildung bzw. das notwendige Vorwissen, um ein Modell anzuwenden, beeinflusst die resultierenden Personalkosten.

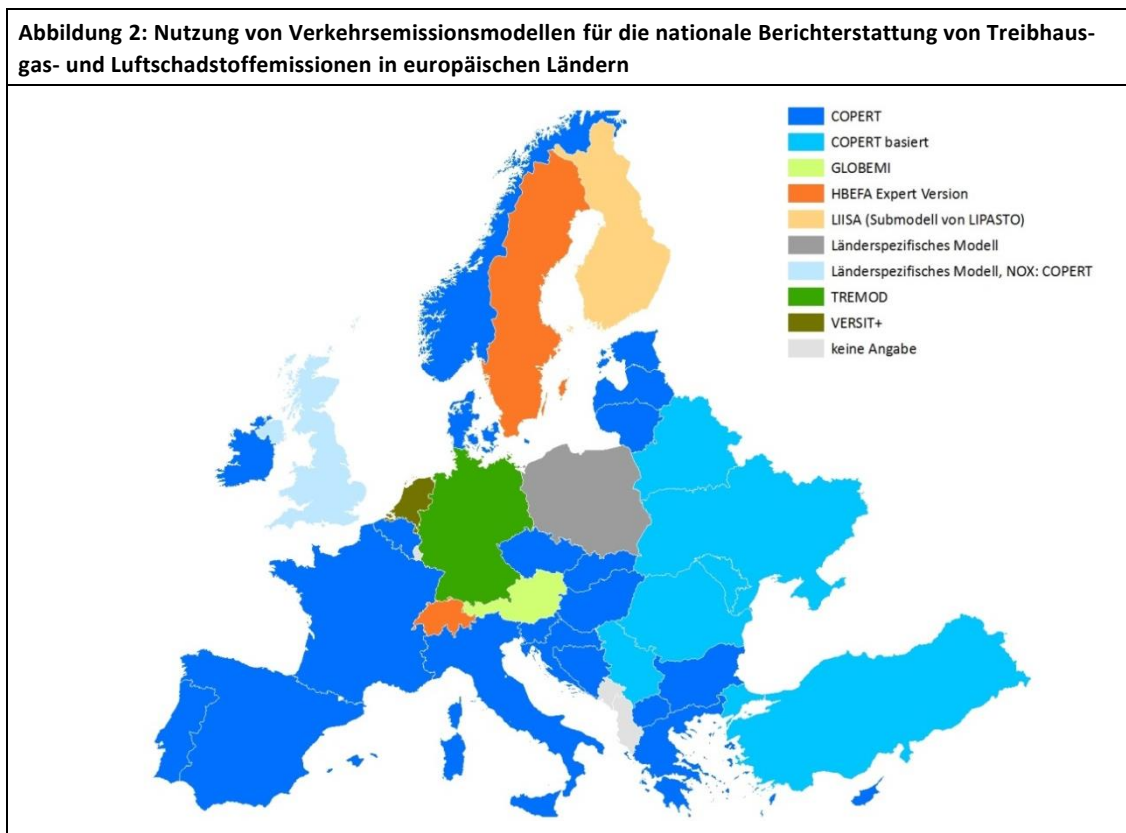
### 2.4.2.3. Weitere Kriterien

- **Zukunftsfähigkeit:** Indikatoren für eine langfristige Nutzbarkeit eines Modells sind (unabhängig vom Anwendungsfall):
  - **Institutionelle Verankerung:** Je mehr Institutionen die Entwicklung eines Modells unterstützen und je besser etabliert die entsprechenden Arbeitsabläufe und Schnittstellen zwischen den beteiligten Institutionen sind, desto besser ist der langfristige Ausblick auf Weiterentwicklung und notwendige Updates, und desto mehr Träger teilen sich die Kosten dieser Aktivitäten.
  - **Anzahl Benutzer:** Ähnlich der institutionellen Verankerung – je mehr Benutzer ein Modell verwenden, desto wahrscheinlicher ist sein weiterer Unterhalt.
  - **Langfristige Finanzierung:** Feste Zusagen langfristiger Finanzierung gibt es mutmaßlicherweise weder für COPERT noch für TREMOD – falls doch, werden sie hier berücksichtigt.
- **Kommunikation:** Die Entscheidung für ein bestimmtes Modell muss kommuniziert und gegebenenfalls gegen Kritik verteidigt werden. Das Kriterium der Kommunikation umfasst Argumente für ein Modell, welche nicht direkt zu Kosten oder Nutzen beitragen, aber helfen können, die Modellwahl zu rechtfertigen. Als Indikator dafür wird die Anzahl und Bedeutung **verfügbarer Publikationen** zum Modell herangezogen; alle Publikationen (nicht nur wissenschaftliche) werden berücksichtigt, aber wissenschaftliche Publikationen stärker gewichtet.

### 3. Verkehrsemissionsmodelle in Europa

#### 3.1. Übersicht

Die Nutzung von Modelltypen für die Berechnung von Verkehrsemissionen ist in Abbildung 2 zusammengestellt. Für diese Länderdarstellung liegt der Fokus auf den Modellen, welche für die nationale Berichterstattung von Treibhausgas- (NIR<sup>1</sup>) bzw. Luftschadstoffemissionen (IIR<sup>2</sup>) verwendet werden.



[INFRAS basierend auf EEA 2015a]

Die Karte zeigt die weite Verbreitung von COPERT bzw. darauf basierenden Ansätzen. In 22 der 28 EU-Mitgliedsstaaten wird für die nationale Emissionsberichterstattung das COPERT-Modell oder darauf basierende Submodelle verwendet. Das Modell HBEFA (Expert Version) wird für die inventarisierende Emissionsberechnung in der Schweiz, Schweden, Liechtenstein und künftig auch Monaco eingesetzt. In der EU werden daneben eine Reihe von ausschließlich in den

<sup>1</sup> National Inventory Report unter dem Kyoto Protokoll, welcher jährlich an UNFCCC eingereicht wird.

<sup>2</sup> Informative Inventory Report, welcher jährlich unter der UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution („Genfer Konvention“) ans UN ECE Sekretariat eingereicht wird.

betreffenden Ländern eingesetzten Modellen verwendet: TREMOD in Deutschland, GLOBEMI in Österreich, LIISA in Finnland, VERSIT+ in den Niederlanden. Daneben sind weitere länderspezifische Modelle im Einsatz, wie z.B. in Polen, Malta oder Luxemburg.

Für die beiden im Zentrum dieser Untersuchung stehenden Modelle COPERT und TREMOD sind in Kapitel 4 bzw. Kapitel 5 detaillierte Beschreibungen zu finden.

Im Folgenden werden die kennzeichnenden Aspekte der wichtigsten weiteren in Europa eingesetzten Verkehrsemissionsmodelle kurz zusammengefasst. Systematische Kurzübersichten zu den beschriebenen Modellen sind in Anhang 1 zu finden. Die nachfolgenden Ausführungen beruhen auf den Arbeiten von Smit et al. 2014, GIZ 2012 und eigenen Recherchen.

## 3.2. Neben COPERT und TREMOD eingesetzte Modelle

### 3.2.1. HBEFA

Das „Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“, kurz HBEFA, wurde ab 1995 im Auftrag der Umweltbundesämter von Deutschland, Österreich und der Schweiz entwickelt. Ab 2010 kamen dazu das Schwedische Zentralamt für Verkehrswesen (Trafikverket), das Norwegische Umweltbundesamt und die Französische Umwelt- und Energiemanagementagentur (ADEME) dazu. Außerdem wird HBEFA von JRC unterstützt, dem Forschungszentrum der Europäischen Kommission (BAFU 2010). Dementsprechend enthält HBEFA Daten zu diesen sechs Ländern (Deutschland, Österreich, Schweiz, Norwegen, Schweden, Frankreich).

Aktuell wird die Version HBEFA 3.2 (Keller 2014) angeboten. Seit 2014 wird HBEFA im Rahmen eines Auftrags der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) auch in einer Version für China weiterentwickelt und auf die spezifischen Gegebenheiten in diesem Raum angepasst (siehe Shengyang et al. 2014). HBEFA wird betreut und weiterentwickelt von INFRAS, einem unabhängigen Forschungsinstitut in der Schweiz. Dabei werden Daten und Informationen aus verschiedenen Quellen zusammengetragen und abgeglichen.

HBEFA ist eine auf Microsoft Access basierende Datenbank, welche die direkten („tank-to-wheel“) Emissionsfaktoren den gängigen Straßenfahrzeugkategorien (Personenkraftwagen, leichte Nutzfahrzeuge, schwere Nutzfahrzeuge, Busse und Zweiräder) enthält. HBEFA enthält Emissionsfaktoren zu allen regulierten und den meisten nicht-regulierten Luftschadstoffen, den Treibhausgasen sowie Kraftstoffverbrauchsfaktoren, spezifiziert nach Fahrzeugschichten, Längsneigungen und Verkehrssituationen. Die Faktoren sind zudem für „warme“ Emissionen (d.h. Motoren im betriebswarmen Zustand), Kaltstartzuschläge und Verdampfungsemissionen (d.h. Abstell-Emissionen, Tankatmung, „running losses“) auswertbar. Die Emissionsfaktoren können in unterschiedlicher räumlicher Auflösung (Einzelstrecke oder nationale, regionale bzw. lokale Durchschnittswerte) ausgewertet werden.

HBEFA existiert in zwei Versionen: Die öffentliche („public version“) enthält die Emissionsfaktorendatenbank auf unterschiedlichen, vordefinierten Aggregationsstufen. Sie ist allgemein zugänglich und kostenpflichtig (250 EURO). Die Expertenversion wird ausschließlich an ausgewählte Personen und Institutionen abgegeben, welche die Entwicklung von HBEFA unterstützen. Die Expertenversion ist mit zusätzlichen Modulen und Funktionalitäten (Flotten- und Emissionsmodell) ausgestattet.

HBEFA besteht aus drei Submodulen: Dem Flottenmodell, der Emissionsfaktorendatenbank und dem Emissionsmodell. Öffentlich zugänglich ist dabei ausschließlich die Emissionsfaktorendatenbank. Die wichtigsten methodischen Grundzüge der HBEFA-Module lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Flottenmodell (Expertenversion): Produziert die Fahrleistungsgewichtung nach den so genannten Fahrzeugschichten (Fahrzeuge derselben Fahrzeugkategorie, Technologie, Größenklasse, EURO-Stufe bzw. Fahrzeugalter) für die Aggregation von Emissionsfaktoren nach räumlichen Einheiten (z.B. Straßenkategorien) und Referenzjahren. Dabei werden Daten zu Fahrzeugbeständen und –alter, Fahrzeugeigenschaften (Klimaanlagen, DPF, DeNO<sub>x</sub>-Technologien und Auslastungsmuster für SNF) und spezifische Fahrleistungen (nach Größenklassen, Fahrzeugalter, etc.) verarbeitet. Für die Prognosen lassen sich die Flottendaten mit Hilfe von Angaben zu Neuzulassungen und Überlebenswahrscheinlichkeiten der Fahrzeuge im Bestand fortschreiben.
- Emissionsfaktoren: Im Emissionsfaktoren-Modul können die nach der Flottenzusammensetzung und Verkehrssituationen gewichteten oder die ungewichteten Emissionsfaktoren abgefragt werden. Die warmen Emissionsfaktoren werden in HBEFA nach dem Verkehrssituationen-Ansatz modelliert. Das HBEFA-Verkehrssituationenschema besteht aus 276 vordefinierten Situationen, d.h. Einheiten mit gleichem Raumtyp (städtisch/ländlich), Straßentyp (Autobahn, Hauptverkehrsstraße, etc., Geschwindigkeitslimit und Verkehrsqualitätsstufe (frei/dicht/gesättigt/Stop+Go). Für diese Situationen sind typische Fahrmuster hinterlegt, die auf der Analyse von realen Fahrverhaltensuntersuchungen beruhen. Auf deren Basis werden mit dem PHEM-Modell der Technischen Universität Graz die Basis-Emissionsfaktoren von HBEFA modelliert (Hausberger et al. 2009, Rexeis et al. 2013). Für die Kalibrierung von PHEM werden die Resultate von umfangreiche Messkampagnen (Prüfstandsmessungen) von Fahrzeugemissionen verwendet, finanziert im Wesentlichen durch die beteiligten Umweltbundesämter und Institutionen. Die Kaltstart-Emissionsfaktoren basieren auf einem Modell der Schweizerischen EMPA (Weilenmann et al. 2009), während die Verdampfungsemissionsfaktoren mit dem COPERT-Ansatz modelliert werden, siehe Kapitel 4. Der Einfluss von Klimaanlagen wird ebenfalls berücksichtigt (gemäß Weilenmann et al. 2010).



- Emissionsmodell (Expertenversion): Mit dem Emissionsmodell können die Gesamtemissionen für ein bestimmtes Gebiet (Land, Region, Stadt, etc.) oder Teilnetz berechnet werden. Dazu sind die Verkehrsaktivitäten (Fahrleistungen oder Belastungen) als Eingangsdaten ins Modell zu übertragen, beispielsweise auf der Grundlage eines Verkehrsmodells. Im Emissionsmodell werden anschließend diese Angaben mit den Emissionsfaktoren bzw. den Gewichtungsfaktoren aus dem Flottenmodell verknüpft und somit die Gesamtemissionen berechnet.

HBEFA gilt bei den beteiligten Ländern als Standarddatenquelle für Emissionsfaktoren. Die Modelle COPERT und TREMOD beziehen die Emissionsfaktoren von HBEFA und bauen sie in die jeweilige Methodik ein, weitere Ausführungen dazu siehe Kapitel 4 bzw. 5.

Der typische Einsatzbereich von HBEFA liegt nebst der Inventarisierung von Emissionen auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene bei Maßnahmenbeurteilungen und Umweltwirkungsabschätzungen und Szenarienanalysen. Häufig werden die mit der Expertenversion von HBEFA berechneten Emissionen auch als Input für Luftschadstoff-Immissionsmodelle verwendet.

### 3.2.2. VERSIT+

VERSIT+ wird seit 2005 vom Niederländischen Institut für angewandte Forschung TNO entwickelt und hat seither grundlegende Überarbeitungen erfahren. Die Finanzierung erfolgt über den staatlichen Grundbeitrag, den TNO u.a. für die Entwicklung von Emissionsfaktoren und -Modellen erhält, sowie über spezifische Projekte.

Mit VERSIT+ lassen sich die direkten (tank-to-wheel) Emissionen bzw. Emissionsfaktoren für CO, HC, NO<sub>x</sub> und CO<sub>2</sub>, sowie der Kraftstoffverbrauch für Personenkraftwagen, leichte Nutzfahrzeuge, Busse, LKW und Sattelzüge berechnen. VERSIT+ ist nicht öffentlich zugänglich. Ausgewählte Resultate aus VERSIT+ – Emissionen und Emissionsfaktoren – werden aber jährlich durch die zuständigen staatlichen Stellen publiziert.

Die Methodik von VERSIT+ lässt sich wie folgt zusammenfassen: Die ursprüngliche Version bestand aus einem Regressionsmodell, das eine Abhängigkeit zwischen den spezifischen Emissionen (in g/km) und den Verkehrsbedingungen herstellte. Die Verkehrsbedingungen wurden charakterisiert durch verschiedene Parameter wie Leerlaufzeit, Durchschnittsgeschwindigkeit, positive kinetische Energie, etc. Das multivariate Regressionsmodell basierte auf umfassenden Prüfstandsmessungen („bag“-Daten) und berücksichtigte die Varianz der Emissionsfaktoren bei gleicher mittlerer Geschwindigkeit (Smit et al. 2005). In der aktuellen Version von VERSIT+ wurde dieser Ansatz verfeinert, indem hochaufgelöste (modale Messungen; 1Hz) Fahrmuster als Modellinput verwendet werden. Mit Hilfe der Momentangeschwindigkeit und einer Hilfsva-

riable (aus Geschwindigkeit und Beschleunigung) werden für zehn verschiedene Bereiche Regressionsmodelle für die Basis-Emissionsfaktoren geschätzt. Die Schätzqualität dieser Modelle ist deutlich höher als in der ursprünglichen Version (Ligterink and De Lange 2009). Dieser Ansatz kommt für die leichten Motorfahrzeuge zur Anwendung. Für die schweren Motorfahrzeuge werden andere Regressionsmodelle verwendet (Ligterink et al. 2012). Für die SNF werden die Emissionsfaktoren in g/Tonnen-km in Abhängigkeit der Momentangeschwindigkeit und der spezifischen Motorenleistung (kW/Tonne; als Funktion von Beladung und Fahrzeugklasse) modelliert. Außerdem beinhaltet das Regressionsmodell die Beschleunigung als dynamische Variable. Sowohl bei den leichten als auch bei den schweren Motorfahrzeugen wird die Neigung der Straße nicht direkt modelliert sondern über angepasste Beschleunigungen einbezogen. Anders als bei den leichten Motorfahrzeugen basieren die Regressionsmodelle bei den schweren Motorfahrzeugen auf PEMS (Portable Emission Measurement System)-Messungen. Diese on-board Messsysteme sind gleichermaßen geeignet für die Entwicklung von VERSIT+.

Kaltstartemissionen werden in VERSIT+ aus den Differenzen der Gesamtemissionen zu den warmen Emissionen modelliert und für ländliche und städtische Emissionsfaktoren mit entsprechenden Korrekturfaktoren berücksichtigt.

Für die Berechnung der Gesamtemissionen sind detaillierte Fahrverhaltensdaten als 1Hz-Messungen (z.B. mit Hilfe von GPS oder Mikrosimulationen des Verkehrs) notwendig. Gleichzeitig wurden aus VERSIT+ Emissionsfaktoren (in g/km) für die Niederländische Fahrzeugflotte in vordefinierten Verkehrssituationen (z.B. städtisch-frei, städtisch-Stau, Autobahn-80 km/h, etc.) abgeleitet (siehe TNO 2006, TNO 2013). Mit diesen Faktoren werden nationale oder lokale Emissionsinventare berechnet oder die Grundlagen für Immissionsmodelle erstellt. Außerdem werden VERSIT+-Emissionsfaktoren in diversen Verkehrsplanungstools verwendet.

### 3.2.3. LIISA

LIPASTO ist ein Berechnungssystem zur Ermittlung der verkehrsbedingten direkten (tank-to-wheel) Emissionen in Finnland und wird seit 1988 kontinuierlich weiterentwickelt (LIPASTO 2015). LIPASTO umfasst Submodelle für alle Verkehrsträger, LIISA bezeichnet das Submodul für den Straßenverkehr. LIPASTO bzw. LIISA wird durch das „Technical Research Centre of Finland“ VTT in Helsinki betreut und weiterentwickelt. Unterstützt und finanziert werden diese Arbeiten vom Finnischen Umweltministerium, dem Verkehrs- und Kommunikationsministerium und privaten Unternehmen. Die Nachführungen der Inputdaten (Flotten, Fahrleistungen) werden durch das Statistische Amt Finnlands unterstützt. Die aktuelle Version von LIISA datiert aus dem Jahr 2012 und beinhaltet Daten bis 2012, sowie Prognosen bis 2032. LIISA ist nicht öffentlich zugänglich, auf der Website von VTT sind ausgewählte Modellresultate für Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen, sowie Kraftstoffverbrauch publiziert.

LIISA enthält Emissionsfaktoren der regulierten Luftschadstoffe und der Treibhausgase, sowie den Kraftstoffverbrauch (Diesel, Benzin, neu formulierte Kraftstoffe) für PKW, leichte Nutzfahrzeuge, Busse und SNF, aggregiert nach städtischen Gebieten und Autobahnen, sowie als Mittelwerte für Finnland. Zudem lassen sich die Emissionsfaktoren nach den Straßentypen Hauptverkehrsstraße, Sammelstraße, Quartiersstraße, Verbindungsstraße und nach Raumtypen (bebaut, ländlich) differenzieren.

Die Emissionsfaktoren werden aus verschiedenen Quellen zusammengestellt und auf die Finnischen Gegebenheiten angepasst, die wichtigsten davon sind: HBEFA, ARTEMIS (Vorgängerprojekt von HBEFA, beauftragt durch die Europäische Kommission) und COPERT. Außerdem fließen eigene Messungen von VTT in LIISA ein, diese werden primär dazu verwendet, flottenspezifische finnische Gegebenheiten abzubilden, z.B. das Verhalten von Fahrzeugen bei extrem tiefen Temperaturen.

Nebst der nationalen Emissionsberichterstattung wird LIISA für regionale und lokale Emissionsinventare, sowie für Beurteilungen von Umweltmaßnahmen und Emissionsprognosen verwendet.

### 3.2.4. Weitere Modelle

Nebst COPERT und TREMOD, sowie den oben beschriebenen Modellen sind weitere, länderspezifische Modelle in den EU28 Mitgliederländern in Anwendung:

- **Polen:** Länderspezifische Berechnungsmethodik auf der Basis von Kraftstoffverbräuchen (Tier 1-Methode mit Standardemissionsfaktoren aus IPCC).
- **Österreich:** länderspezifisches Modell (Globemi)

Für diese Ansätze lagen für die im vorliegenden Projekt durchgeführte Literaturanalyse zu den Europäischen Verkehrsemissionsmodellen keine detaillierten Informationen vor. Aus diesem Grund und wegen der eingeschränkten Bedeutung dieser Ansätze für das vorliegende Projekt wird auf eine detailliertere Darstellung an dieser Stelle verzichtet.

Nicht für die nationalen Berichterstattungen aber für die Beurteilung ausgewählter Fragestellungen sind weitere Modelle zur Berechnung der Verkehrsemissionen erwähnenswert, ohne Anspruch auf Vollständigkeit und detaillierte Beschreibungen (Smit et al. 2014):

- **PHEM** (Passenger and Heavy Duty Vehicles Emission Model): Entwickelt und betreut von der Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (FVT) an der Technischen Universität Graz, Österreich. Mit dem Mikrosimulationsmodell PHEM können auf der Basis von Fahrmustern (Geschwindigkeits-Zeit-Kurven) die dazugehörigen Fahrzeugemissionen simuliert werden. Basis sind Motorenkennfeld-Daten (über die Motorenleistung

und Drehzahl), die mit Hilfe von Prüfstandsmessungen kalibriert werden. PHEM ist die Grundlage für die Ermittlung von Emissionsfaktoren für HBEFA und damit implizit auch für TREMOD und COPERT.

- **PΔP** (Power-delta-Power): Entwickelt an der University of Queensland, Australien. Erlaubt die Mikrosimulation von Emissionen auf der Basis von Motorenleistung und der Veränderung (delta-Power) derselben. Für die Entwicklung wurden real-world Emissionsmessungen beigezogen. Mit PΔP können auf der Basis von Fahrmustern (Geschwindigkeits-Zeit-Kurven) die Fahrzeugemissionen simuliert werden.
- **NEMO** (Network Emission Model): Emissionsmodell, entwickelt durch die Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (FVT) an der Technischen Universität Graz, Österreich, für Emissionsberechnungen mit Hilfe von Verknüpfungen von Flotten- und Aktivitätsdaten mit den Emissionsfaktoren aus PHEM (siehe oben).
- **MOVES** (Motor Vehicle Emission Simulator): Im Auftrag der Amerikanischen Umweltbehörde (EPA) entwickeltes Emissionsmodell. Berechnet die Verkehrsemissionen auf der Basis von Flotten- und Aktivitätsdaten, sowie den entsprechenden Emissionsfaktoren. Zurzeit läuft im Auftrag des Umweltbundesamts (UBA) eine Studie, welche das MOVES-Modell mit HBEFA vergleicht (Teilprojekt des UBA FKZ 3713 47 100 "Ermittlung von Emissionsfaktoren von Kraftfahrzeugen unter Berücksichtigung zukünftiger Antriebskonzepte und der Vorkette von Kraftstoffen"). Resultate dieser Untersuchung sind im Frühjahr 2016 zu erwarten.
- **TREMOVE**: Wird durch das Niederländische Forschungsinstitut TML in Leuven, Niederlande, entwickelt. TREMOVE ist ein übergeordnetes, ökonomisches Modell, das auf die Beurteilung von Politikmaßnahmen auf aggregierter, strategischer Ebene ausgelegt ist. Das Modell besteht aus verschiedenen, verkehrsträgerspezifischen Modulen (Flotte, Verkehrsnachfrage, Verbrauch und Emissionen, volkswirtschaftliche Auswirkungen). Straßenseitig ist der methodische Ansatz an COPERT angelehnt.

## 4. Detailbeschreibung COPERT

### 4.1. Geschichte und Einbettung

#### 4.1.1. Geschichte

COPERT hat seinen Ursprung in einer Methodik, welche von einer 1989 als Teil einer europäischen Initiative einberufenen Arbeitsgruppe entwickelt wurde, mit dem Ziel, Emissionsinventare auf nationaler und regionaler Ebene zu erstellen. Seitdem wird COPERT kontinuierlich (jährlich) aktualisiert, um den gegenwärtigen Wissenstand in den Forschungsbereichen Emissionen und Straßenverkehr zu reflektieren.

COPERT wird international verwendet, um Emissionen von Luftschadstoffen und Treibhausgasen aus dem Straßenverkehr zu berechnen. Die Applikation verwendet den oft als „Durchschnittsgeschwindigkeits-Modell“ bezeichneten Ansatz und ist konzipiert für:

- Emissionsinventare auf nationaler Ebene oder Länderebene, sowie
- Berechnung von Emissionsfaktoren in Funktion der durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit für die Verwendung in straßenbasierten Emissionsberechnungen.

Die **Versionsgeschichte** von COPERT lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Applikation durchlief vier „große“ Updates: Die Originalversion COPERT 85 (1989) wurde abgelöst durch COPERT 90 (1993), COPERT II (1996-2000), COPERT III (2000-2006) und schließlich COPERT 4, welches seit November 2006 die offizielle aktuelle Version darstellt.
- Jährlich werden „kleine“ Updates publiziert; das aktuellste ist COPERT 4 v 11.3 (Juni 2015). Zu jedem „kleinen“ Update erscheint eine technische Kurzdokumentation.
- Die aktuelle Version ist das Resultat verschiedener Aktivitäten und Projekte der Europäischen Kommission, des European Topic Centre for Air Pollution and Climate Change Mitigation (ETC/ACM), der ERMES-Arbeitsgruppe (European Research Group on Mobile Emission Sources) u.a.
- Das nächste „große“ Update (COPERT 5) ist für 2016 geplant.

Weitere Hinweise zur Modellgeschichte:

- COPERT II war die erste Version mit grafischer Benutzeroberfläche, basierend auf MS Access 2. Sie beinhaltete Emissionsfaktoren bis und mit Euro-1 und wurde benutzt, um mit Hilfe des RAINS-Modells (Regional Acidification Information and Simulation) Emissionsobergrenzen herzuleiten.
- COPERT III enthielt erstmals Menüs ähnlich wie MS Office 2000 und basierte auf VBA für MS Access 1997. Gegenüber Version II enthielt es neue warme Emissionsfaktoren für Euro 1,

eine Kaltstart-Methodik für Personenwagen neuer als Euro-1, die Verschlechterung der spezifischen Emissionen während der Lebensdauer, den Effekt des Verbots bleihaltigen Benzins in Europa, eine alternative Methodik für Verdampfungsemissionen, die detaillierte Unterscheidung von Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen, aktualisierte warme Emissionsfaktoren für nichtregulierte Schadstoffe etc.

- Die aktuelle Version COPERT 4 deckt alle Fahrzeugtechnologien bis Euro-6 für PKW/Lieferwagen, Euro-VI für schwere Nutzfahrzeuge und Euro-3 für Zweiräder ab. Es beinhaltet signifikante Verbesserungen ggü. COPERT III in Bezug auf Software und Methodik; die wichtigsten sind die Möglichkeit, Zeitreihen in einer Datei zu erstellen, verbesserte Import-/Export-Funktionen, Verbesserungen bei der Flottenkonfiguration, Anpassungen der Emissionsfunktionen, Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für Hybridfahrzeuge, N<sub>2</sub>O/NH<sub>3</sub>-Emissionsfaktoren für PKW und Lieferwagen, Emissionsfaktoren für Partikelmasse und Schwebeteilchen (auch non-exhaust), eine neue Methodik für Verdampfungsemissionen, Verbesserungen bei schweren Nutzfahrzeugen u.a.

Weiterentwicklungen von COPERT (welche in der vorliegenden Studie nicht beurteilt werden) sind:

- Eine australische COPERT-Version wurde kürzlich entwickelt, welche lokale Bedingungen berücksichtigt. Die Unterschiede zu COPERT 4 sind eine angepasste Fahrzeugklassifikation, die räumliche Auflösung der Emissionsfaktoren (warm/Kaltstart) und ein anderes Flottenmodell.
- Die neuste Erweiterung zu COPERT ist das SIBYL-Modell (<http://www.emisia.com/sibyl>). Es wurde v.a. für die Berechnung von Zukunftsszenarien von Emissionen und Energieverbrauch des Straßenverkehrs entwickelt. SIBYL enthält ein Flottenmodell, welches eine mit COPERT kompatible (und um zukünftige Fahrzeugtechnologien erweiterte) Flottenstruktur erzeugt. Unterschieden werden Fahrzeugkategorie, Energieträger, Antriebstechnologie, Größenklasse und Alter. Jährliche Schätzwerte der Flotte für zukünftige Jahre werden basierend auf historischen Zeitreihen generiert, wobei Neuzulassungen (neue oder Second-Hand-Fahrzeuge), Überlebenswahrscheinlichkeiten und Abmeldungen berücksichtigt werden. Vorhersagen bis 2050 können mit Vorgaben bezüglich Flotte, Fahrleistungen oder Energieverbrauch erstellt werden. Die so produzierte Flotte kann mit COPERT-Emissionsfaktoren verknüpft werden, um Emissions- und Energieberechnungen für zukünftige Jahre vorzunehmen. SIBYL ist im Gegensatz zu COPERT als Applikation kostenpflichtig.

### 4.1.2. Institutionelle Einbettung und Finanzierung

Die Entwicklung und Fortschreibung von COPERT wird finanziell von der Europäischen Umweltagentur (EEA) über fortlaufende Budgets im Rahmen des European Topic Centre for Air Pollution and Climate Change Mitigation (ETC/ACM) unterstützt.

## 4.2. Modellentwickler

Die Entwicklung von COPERT wird von der EEA im Rahmen der Aktivitäten des ETC/ACM koordiniert und wird von der Europäischen Kommission durch das JRC (Joint Research Centre) wissenschaftlich begleitet. Die Methodik von COPERT 4 ist Teil der EMEP/EEA-Leitlinien für die Berechnung von Luftschadstoffemissionen (EEA 2014) und ist konsistent mit den IPCC-Leitlinien von 2006 für die Berechnung von Treibhausgasemissionen (IPCC 2006).

Die Hauptentwickler des Modells (Software, Methodik, etc.) sind EMISIA SA und LAT/AUTH (Laboratory of Applied Thermodynamics / Aristotle University of Thessaloniki); sie stellen auch die technische und wissenschaftliche Betreuung sicher. EMISIA wurde 2008 als Spin-Off des LAT/AUTH gegründet. Die Firma ist spezialisiert auf Emissionsinventare, Emissionsmodellierung, und Wirkungsabschätzungen politischer Entscheidungen. Die Belegschaft besteht aus Maschinen- und Chemieingenieuren sowie Softwareentwicklern mit fundiertem Hintergrundwissen im Bereich Umwelt. Der Fokus liegt (wenn auch nicht ausschließlich) auf Verkehrsemissionen (Straße, Schiene, Luftfahrt) und Verkehrsstatistik.

## 4.3. Nutzer und Anwendungsfelder

### 4.3.1. Nutzer

#### Staatliche Institutionen

COPERT ist in der EU die Referenz-Applikation für die Berechnung von Luftschadstoffemissionen auf nationaler Ebene; sie wird offiziell von **22 von 28 EU-Mitgliedstaaten** verwendet, um nationale Straßenverkehrs-Emissionsinventare zu berechnen, welche den Anforderungen der Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (CLRTAP) und der UN-Rahmenkonvention zum Klimawandel (UNFCCC) entsprechen.

COPERT wird von **mehreren Ländern außerhalb der EU** verwendet. Speziell für Australien wurde kürzlich eine angepasste Version von COPERT entwickelt (s. oben). Daneben benutzen zahlreiche **lokale Behörden** COPERT, z.B. regionale Umweltbehörden.

### **Firmen und Verbände**

Der Privatsektor, einschließlich der Automobilindustrie, stellt rund 45% der COPERT-Nutzer (EMISIA-Statistik). Die meisten Firmen sind in den Bereichen Beratung, Bau, Kraftstoffe, Forschung (Verkehr/Emissionen) u.a. tätig.

### **Wissenschaftliche Nutzer**

Universitäten und wissenschaftliche Nutzer machen rund 38% der COPERT-Nutzer aus (EMISIA-Statistik), wie z.B. die Aristoteles-Universität Thessaloniki (Griechenland), die Aarhus-Universität (Dänemark), die University of Queensland (Australien), die Southwest Jiaotong University (China), u.a.

### **Weitere Nutzer**

Neben staatlichen Behörden, Firmen und Universitäten laden hunderte individuelle Nutzer COPERT herunter und verwenden die Applikation. Gemäß der EMISIA-Statistik stammen die meisten aus europäischen Ländern wie IT, ES, FR, PT, GR, PL, DE, UK, BE.

## **4.3.2. Anwendungsfelder**

### **Monitoring, Inventare**

Abbildung 2 zeigt in einer Kartenansicht die Verwendung von COPERT als nationales Straßenverkehrs-Emissionsmodell für die Verpflichtungen zur Berichterstattung gegenüber internationalen Konventionen. Anwendungen auf nationaler Ebene sind u.a. publiziert in Burón et al. (2004) für Spanien, Soylu (2007) für die Türkei, oder Cai und Xie (2007) für China. Beispiele von Anwendungen auf subnationaler Ebene (Städte, Provinzen etc.) sind dokumentiert von Mensink et al. (2000), Saija und Romano (2002) oder Bellasio et al. (2007).

### **Szenarien, Vorhersagen**

COPERT wurde für die Evaluation von Zukunftsszenarien verwendet, wobei die unterstellten Flottenzusammensetzungen außerhalb des Modells aufbereitet wurden. Beispiele dafür sind Burón et al. (2005), Kousoulidou et al. (2008), Leinert et al. (2009) oder Amann et al. (2010).

### **Wirkungsabschätzungen**

COPERT wurde in zahlreichen Studien zu Regulierungsfolgenabschätzung, Trendanalysen, und zur Erzeugung von Inputs für Immissionsmodelle und Wirkungsabschätzung auf lokaler Ebene



verwendet, entweder direkt, mit Anpassungen, oder in Kombination mit anderen Emissionsmodellen. Beispiele dafür sind publiziert in Jansen und Denis (1999), Parra et al. (2006), Ntziachristos et al. (2009), EEA (2013) oder Coelho et al. (2014).

### Weitere Anwendungen

Neben der Anwendung in Emissionsinventaren, Zukunftsszenarien und Wirkungsabschätzungen wurde COPERT für viele andere Zwecke eingesetzt. Die wichtigsten sind Tunnelstudien, akademische Forschung und Vorlesungen, Abfrage von Emissionsfaktoren u.a. Beispiele dafür sind De Fre (1994), Chan und Ning (2005) oder Barlow und Boulter (2009).

### Eignung

COPERT ist für den Einsatz in allen oben beschriebenen Anwendungsbereichen geeignet, d.h. Monitoring und Inventare, Szenarien und Zukunftsvorhersagen, Wirkungs- und Regulierungsfolgenabschätzungen, Herleitung von Emissionsfaktoren, akademische Forschung etc.

Als wichtigste **Stärken** von COPERT gelten:

- Das Modell deckt alle wichtigen Schadstoffe und Fahrzeugtypen sowie den Zeitraum 1970 bis 2050 ab.
- Der geographische Anwendungsbereich schließt alle europäischen Länder, Asien, Südamerika und Ozeanien ein.
- Eine benutzerfreundliche (MS-Office-ähnliche) grafische Benutzeroberfläche unterstützt Datenimport, -betrachtung und -export.
- Aktuelle, fertig aufbereitete Verkehrsmengengerüste können für die Verwendung mit COPERT bezogen werden, welche auf den zwei EU-Forschungsprojekten TRACCS und FLEETS basieren („COPERT DATA“, vgl. Kapitel 4.6; <http://emisias.com/content/copert-data>). Die Datensätze decken den Zeitraum 2000-2013 und alle EU28-Mitgliedstaaten plus NO, CH, IS, TR, FYROM ab. Jährliche Aktualisierungen sind geplant, um diese Verkehrsmengengerüste aktuell zu halten.

Als **Schwächen** werden genannt:

- COPERT ist nicht für Vorhersagen konzipiert und basiert nicht auf kalibrierten Baseline-Szenarien; daher ist COPERT beschränkt geeignet als Werkzeug für die Evaluation von Zukunftsszenarien und produziert keine interaktiven Grafiken zu Vorhersagen wie andere Modelle (z.B. SIBYL, vgl. Kapitel 4.1).
- COPERT ist für den Straßenverkehr konzipiert; die Applikation enthält keine Grundlagen zu anderen Verkehrsträgern oder zum Nonroad-Sektor.

## 4.4. Systemgrenzen

### 4.4.1. Verkehrsträger

COPERT ist spezifisch für den Straßenverkehr konzipiert und enthält ausschließlich für diesen Teil die entsprechenden Grundlagen.

### 4.4.2. Fahrzeugkategorien und -technologien

Insgesamt deckt COPERT 266 Fahrzeugschichten (definiert über die Fahrzeugkategorie, Technologie, Subkategorie, Größenklasse und Emissionskonzept) ab. Diese sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Fahrzeugschichten in COPERT 4.				
Fahrzeugkategorie	Technologie	Subkategorie	Größenklasse	Emissionskonzepte
Personenwagen	Benzin		<0,8 l	Vor-ECE
			0,8 - 1,4 l	ECE 15/00-01
			1,4 - 2,0 l	ECE 15/00-02
			>2,0 l	ECE 15/00-03
	Diesel		<1,4 l	ECE 15/00-04
			1,4 - 2,0 l	Konventionell
			>2,0 l	Verbessert Konventionell
	LPG		(Alle)	Open Loop
	E85		(Alle)	Euro-1
	CNG		(Alle)	Euro-2
	2-Takt		(Alle)	Euro-3
	Benzin-elektrisch		<1,4 l	Euro-4
			1,4 - 2,0 l	Euro-5
>2,0 l			Euro-6 Euro-6c	
Leichte Nutzfahrzeuge	Benzin		<3,5 t	Konventionell
	Diesel		<3,5 t	Euro-1 Euro-2 Euro-3 Euro-4 Euro-5 Euro-6 Euro-6c

Tabelle 2: Fahrzeugschichten in COPERT 4.					
Fahrzeugkategorie	Technologie	Subkategorie	Größenklasse	Emissionskonzepte	
Schwere Nutzfahrzeuge	Benzin	Lastwagen	>3,5 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Konventionell</li> <li>▪ Euro-I</li> <li>▪ Euro-II</li> <li>▪ Euro-III</li> <li>▪ Euro-IV</li> <li>▪ Euro-V</li> <li>▪ Euro-VI</li> </ul>	
			Diesel		<=7,5 t
			7,5 - 12 t		
			12 - 14 t		
			14 - 20 t		
			20 - 26 t		
			26 - 28 t		
			28 - 32 t		
			>32 t		
			Last- und Sattelzüge		14 - 20 t
					20 - 28 t
					28 - 34 t
					34 - 40 t
					40 - 50 t
	50 - 60 t				
Busse	Diesel	Linienbusse	Midi <=15 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Konventionell</li> <li>▪ Euro-I</li> <li>▪ Euro-II</li> <li>▪ Euro-III</li> <li>▪ Euro-IV</li> <li>▪ Euro-V</li> <li>▪ Euro-VI</li> </ul>	
			Standard 15 - 18 t		
			Articulated >18 t		
		Reisecars	Standard <=18 t		
	Articulated >18 t				
	CNG	Linienbusse	(Alle)		EEV
Biodiesel	Linienbusse	(Alle)			
Mopeds	Benzin 2-Takt		<50 ccm	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Konventionell</li> <li>▪ Euro-1</li> <li>▪ Euro-2</li> <li>▪ Euro-3</li> </ul>	
	Benzin 4-Takt		<50 ccm		
Krafträder	Benzin 2-Takt		>50 ccm		
	Benzin 4-Takt		<250 ccm		
			250 - 750 ccm		
			>750 ccm		

#### 4.4.3. Komponenten

COPERT berechnet die Emissionen aller wichtigen Luftschadstoffe (CO, NO<sub>x</sub>, VOC, PM, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, Schwermetalle) des Straßenverkehrs sowie Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) und Energie- und Kraftstoffverbrauch. Das Modell bietet auch die Aufteilung in NO/NO<sub>2</sub>, elementaren und organischen Kohlenstoff sowie in die verschiedenen Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe, einschließlich PAHs und POPs an. Die Komponenten nach Emissionsart beinhalten:

- **Betriebswarme Emissionen:** CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM, EC, OM, NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, FC, SO<sub>2</sub>, VOC, NMVOC, diverse Metalle (7) einschließlich Blei.

- **Kaltstart-Emissionen:** CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM, EC, OM, NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, FC, SO<sub>2</sub>, VOC, NMVOC, diverse Metalle (7) einschließlich Blei.
- **Verdampfungsemissionen:** VOC, NMVOC.
- **Nicht-Auspuff- (non-exhaust)-Emissionen:** PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>.
- **Emissionen aus der Kurbelgehäuseentlüftung:** Nicht berücksichtigt.
- **Air-conditioning:** Kraftstoffverbrauch und direkt davon abhängige Schadstoffe.
- **Schmieröl:** CO<sub>2</sub>.
- **SCR:** CO<sub>2</sub>.
- **Gesamtemissionen:** PAH/POP (26), Kohlenwasserstoffe (63), Dioxine/Furane, PCB.

#### 4.4.4. Umweltwirkungen

COPERT deckt nur Betriebsemissionen (TTW, downstream) ab. Emissionen aus der Produktion der Energieträger (WTT, upstream) werden nicht berücksichtigt<sup>3</sup>.

#### 4.4.5. Räumliche Auflösung

COPERT eignet sich für nationale und regionale (auch urbane) Emissionsinventare (Fahrzyklus- oder Sub-Fahrzyklus-basiert).

Für kleinere räumliche Ausschnitte (z.B. Straßenabschnitte) entwickelt EMISIA derzeit ein separates Modell namens „COPERT Street Level“ (<http://emisias.com/content/copert-street-level>). Dieses basiert auf COPERT, stellt aber einen anderen Ansatz für die Emissionsberechnung auf Straßen- bis Stadt-Skala dar. Es ist für die Verwendung zusammen mit Verkehrsanalysetools und für eine breite Palette von Inputdaten konzipiert und die berechneten Emissionen können in einer GIS-Karte visualisiert werden. „COPERT Street Level“ befindet sich noch im Entwicklungsstadium; auf Anfrage kann eine Beta-Version von den Entwicklern für Testzwecke bezogen werden. „COPERT Street Level“ wird im vorliegenden Bericht nicht beurteilt.

#### 4.4.6. Zeitliche Auflösung

Die kleinstmögliche zeitliche Auflösung von COPERT beträgt ein Jahr<sup>4</sup>; das Modell deckt die Zeitspanne von 1970 bis 2050 ab.

#### 4.4.7. Geografische Abdeckung

COPERT wird international für Straßenverkehrs-Emissionsberechnungen auf nationaler oder regionaler Ebene verwendet. Offiziell verwenden 22 der 28 EU-Mitgliedstaaten das Modell für

<sup>3</sup> Diese Funktion ist im SIBYL-Modell (vgl. Kapitel 4.1) vorhanden.

<sup>4</sup> „COPERT Street Level“ wird ab einer stündlichen Auflösung betrieben werden können.

die nationale Emissionsberichterstattung; außerdem wird es in Nicht-EU-Ländern in Asien, Südamerika und Ozeanien verwendet. Anpassungen wie für Australien (s. oben) können von EMI-SIA für praktisch jedes Land mit spezifischen lokalen Bedingungen oder Bedürfnissen vorgenommen werden.

## 4.5. Methodik (Straßenverkehr)

### 4.5.1. Überblick

COPERT wird als "Durchschnittsgeschwindigkeits-Modell" klassifiziert. Diese Bezeichnung bezieht sich primär auf die Methodik der Emissionsfaktoren für betriebswarme Emissionen (in g/Fzkm), welche als Funktion der Durchschnittsgeschwindigkeit berechnet werden. Andere Teilmodelle von COPERT funktionieren jedoch nicht in Abhängigkeit der Durchschnittsgeschwindigkeit (z.B. Verdampfungsemissionen). Generell basiert das Modell auf umfassenden Labormessungen verschiedener Fahrzyklen (betriebswarm/Kaltstart) oder Prüfzyklen (Verdampfungsemissionen), oder von anderen Methoden hergeleiteten Emissionsfaktoren (z.B. Schwermetall-Emissionen, PM-nonexhaust-Emissionen).

Die Teilmodelle von COPERT sind im Folgenden aufgelistet (eine detailliertere Beschreibung findet sich in den folgenden Unterkapiteln):

- Fahrzeugflotte
- Verkehrsaktivitäten und andere Parameter
- Emissionsfaktoren
- Emissionsberechnung
- Energieverbrauch, Kraftstoffbilanz (optional)

### 4.5.2. Fahrzeugflotte

Dieses Teilmodell wird für die Erstellung von Bestandes-Inputdaten verwendet. Die Segmentierung der Flotte ist in Kapitel 4.4.2 beschrieben (total 266 Kategorien). Folgende Eigenschaften sind erwähnenswert:

- *Abgasnachbehandlung*: SCR und EGR; der Benutzer kann den Verbrauch von Urea als Prozentsatz des Kraftstoffverbrauchs angeben, sowie das Verhältnis des Einsatzes von SCR und EGR. Die Berücksichtigung weiterer Technologien (De-NOx-Systeme, Dieselpartikelfilter) ist für die nächste COPERT-Version (5) im Jahr 2016 geplant.
- *Air-Conditioning*: Der Benutzer kann den Anteil mit A/C ausgerüsteter Fahrzeuge sowie den Anteil der A/C-Benutzung an der Betriebsdauer definieren.
- *Beladung, Anzahl Achsen*: Der Benutzer kann den Beladungsgrad und die Anzahl Achsen für LKW und Busse definieren.

### 4.5.3. Verkehrsaktivitäten und andere Parameter

Dieses Teilmodell erstellt Fahrleistungs-Inputdaten einschließlich Fahrleistungsanteile und Fahrgeschwindigkeiten auf Autobahnen sowie urbanen und ländlichen Straßen. Erwähnenswerte Charakteristiken sind:

- **Alters- bzw. Fahrleistungsabhängigkeit der Emissionen:** CO-, NO<sub>x</sub>- und Kohlenwasserstoffemissionen nehmen mit dem Fahrzeualter zu. Dieser Effekt wird in COPERT „mileage degradation“ genannt und für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge ab der Stufe Euro-1 berücksichtigt. CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen sind am stärksten betroffen; bei den Kohlenwasserstoffen ist der Effekt bei den Auspuff-Emissionen vernachlässigbar, während die Verdampfungsemissionen signifikant mit dem Fahrzeualter zunehmen. Feinstaub und Kraftstoffverbrauch sind praktisch nicht betroffen. Diesen Effekten wird Rechnung getragen, indem die kumulativen Fahrleistungen als Inputvariable berücksichtigt werden und als Korrekturfaktoren auf die Basis-Emissionsfaktoren angewendet werden. Der Einfluss der Durchschnittsgeschwindigkeit auf die Rate der Verschlechterung wird berücksichtigt, indem die beobachteten Verschlechterungsfaktoren über städtische und ländliche Straßen kombiniert werden. Dabei wird angenommen, dass die Verschlechterung für Geschwindigkeiten unter- und oberhalb der Durchschnittsgeschwindigkeit in der urbanen (19 km/h) und ländlichen Region (63 km/h) geschwindigkeitsunabhängig ist; dazwischen werden die Werte linear interpoliert.
- **Zuweisung der Fahrleistungen zu Straßentypen:** Der Benutzer kann Prozentanteile der Fahrleistungen der drei Straßentypen (urban, ländlich, Autobahn) angeben (die Summe muss dabei insgesamt 100% ergeben).
- **Umgebungstemperatur:** Die monatliche Minimum-/Maximum-Temperatur muss angegeben werden. Diese Parameter sind für Kaltstart- und Verdampfungsemissionen relevant.
- **Kaltstart-Parameter:** Neben der Umgebungstemperatur geht die durchschnittliche Fahrtdistanz in die Berechnung ein, mit der sich die Anzahl Kaltstartvorgänge aus der Fahrleistung errechnen lässt.
- **Verdampfungs-Parameter:** Dies sind Tankgröße, Größe der Aktivkohlefall, Anteil der Fahrzeuge mit Kraftstoffeinspritzung, Anteil mit Verdampfungskontrolle (z.B. Aktivkohlefall, mehrschichtiger Tank mit niedriger Durchlässigkeit, ORVR<sup>5</sup>), sowie Anteil der Verdampfung nach Straßentyp (urban/ländlich/Autobahn, nur benötigt für die Zuordnung nach Straßentyp).

---

<sup>5</sup> On-board vapour recovery control

#### 4.5.4. Energieverbrauch

##### Bottom-Up-Berechnung

Die Methodik für die Bottom-Up-Berechnung des Energieverbrauchs ähnelt derjenigen der warmen Emissionsfaktoren (vgl. nächstes Kapitel 4.5.5): Grundsätzlich ist der Kraftstoffverbrauch eine Funktion von Fahrzeugtyp (Kraftstoffart, Gewicht/Leistung, Emissionsstufe) und Durchschnittsgeschwindigkeit. Die Formeln für jeden Fahrzeugtyp und Schadstoff wurden mittels Regressionsanalyse aus Wertepaaren von Verbrauchsfaktoren und Durchschnittsgeschwindigkeiten hergeleitet (vgl. Abbildung 3). Datenquelle dafür sind wie bei den warmen Emissionsfaktoren durch die ERMES-Gruppe (<http://www.ermes-group.eu/web/>) koordinierte Messprogramme, aus welchen mit Hilfe des PHEM-Modells (s. z.B. Hausberger et al. 2009) Emissionsfaktoren für die HBEFA-Verkehrssituationen berechnet wurden. Diese stellen zusammen mit den assoziierten Durchschnittsgeschwindigkeiten die Inputdaten für die COPERT-Funktionen dar.

Somit beinhalten die Eingangsdaten für die COPERT-Funktionen bereits die kontinuierlichen Effizienzverbesserungen, welche sich aufgrund der CO<sub>2</sub>-Vorgaben der EU ergeben, sowie deren Abschwächung durch das reale Fahrverhalten; allerdings stellen diese Eingangsdaten Durchschnittswerte nach Euro-Stufen dar, welche mehrere Baujahre umfassen. Zudem sind die Eingangsdaten aus HBEFA repräsentativ für eine bestimmte Fahrzeugauswahl im Messkollektiv von HBEFA, welche nicht repräsentativ sein muss für ein bestimmtes Land, da sich innerhalb eines bestimmten Fahrzeugsegments die Flottenzusammensetzung je nach Land beträchtlich unterscheiden kann. Beispielsweise dürften Benzin-Fahrzeuge der Klasse Pkw, 1,4-2,0 L im Mittel in Deutschland einen höheren Hubraum aufweisen (zwischen 1,8 und 2,0 L) als z.B. in Italien, wo der mittlere Hubraum dieser Klasse näher bei 1.5 L sein dürfte. Diese beiden Effekte werden in COPERT mit der so genannten **CO<sub>2</sub>-Korrektur** behandelt: Der reale Kraftstoffverbrauch ausgehend von den in COPERT hinterlegten Basis-Verbrauchsfaktoren, wird mit einer Reihe von Formeln korrigiert (siehe Mellios et al. 2011). Dazu müssen Angaben zum Kraftstoffverbrauch gemäß Typenprüfung, Fahrzeuggewicht, Hubraum, sowie Anteil an den Neuzulassungen (z.B. aus der CO<sub>2</sub>-Monitoring-Datenbank der EU<sup>6</sup>, gestützt auf Verordnung EG Nr. 443/2009) vorliegen. Daraus kann der reale Kraftstoffverbrauch berechnet und in Beziehung zum von COPERT gesetzten Basis-Kraftstoffverbrauch gesetzt werden. Der so gebildete Korrekturfaktor wird dann auf den Basis-Kraftstoffverbrauch der Euro-4- bis Euro-6-Personenwagen angewendet.

Letztendlich behandelt dieses Vorgehen prinzipiell dieselben Effekte wie TREMOD (siehe Kapitel 5.5.4), d.h. eine Basiskorrektur für die länderspezifische Flottencharakteristik und die

<sup>6</sup> <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/co2-cars-emission-8>

Abbildung der jährlichen Effizienzveränderungen des Kraftstoffverbrauchs, letztere unter Berücksichtigung der zunehmenden Abweichungen zwischen Verbrauch nach NEFZ und dem Realverbrauch.

### Vergleich mit den Top-Down-Werten der Energiestatistik

Die Kraftstoffbilanz ist eine optionale Funktion in COPERT, um den Bottom-Up berechneten Energieverbrauch an die Top-Down-Daten der Energiestatistik anzupassen. Der Benutzer gibt dafür den Kraftstoffverbrauch nach Kraftstofftyp an, um diesen statistischen Wert mit dem von der Software berechneten Wert zu vergleichen. Die Abweichung zwischen beiden Werten sollte ein paar Prozentpunkte nicht überschreiten, damit die Inputdaten als repräsentativ für die Anwendung gelten können.

Die Emissionen der kraftstoffabhängigen Schadstoffe (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, Schwermetalle) werden, wenn dieser vom Benutzer angegeben wird, auf der Basis des statistischen Energieverbrauchswerts berechnet. Dafür werden die von COPERT berechneten Emissionen mit dem Verhältnis des statistischen (Top-Down) zum berechneten (Bottom-Up) Energieverbrauch multipliziert.

Falls eine signifikante Abweichung zwischen beiden Werten besteht, muss möglicherweise das Verkehrsmengengerüst angepasst werden. Der Benutzer kann folgende Parameter anpassen: i) den den verschiedenen Straßentypen zugeordneten Fahrleistungsanteil, ii) die den verschiedenen Straßentypen zugeordneten Geschwindigkeiten, oder iii) die Verteilung der Flotte auf verschiedene Technologien. Diese Anpassungen können nicht automatisiert in COPERT umgesetzt werden, sondern müssen manuell an den Inputdaten vorgenommen werden.

### 4.5.5. Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren in COPERT werden unterschieden nach:

- Emissionsart (warm, Kaltstart, Verdampfung),
- Fahrzeugkategorie,
- Straßentyp.

Die zur Verfügung stehenden Schadstoffe können in vier Gruppen unterteilt werden:

- **Gruppe 1:** Schadstoffe, für welche eine detaillierte Methodik aufgrund spezifischer Emissionsfaktoren für verschiedene Straßentypen (urban, ländlich, Autobahn) und Motorzustände existiert (CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, VOC, CH<sub>4</sub>, NMVOC, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, PM, Partikelanzahl und -oberfläche).
- **Gruppe 2:** Direkt vom Kraftstoffverbrauch abgeleitete Schadstoffe, deren Resultate derselben Qualität wie Gruppe 1 entsprechen (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, Pb, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Se, Zn).



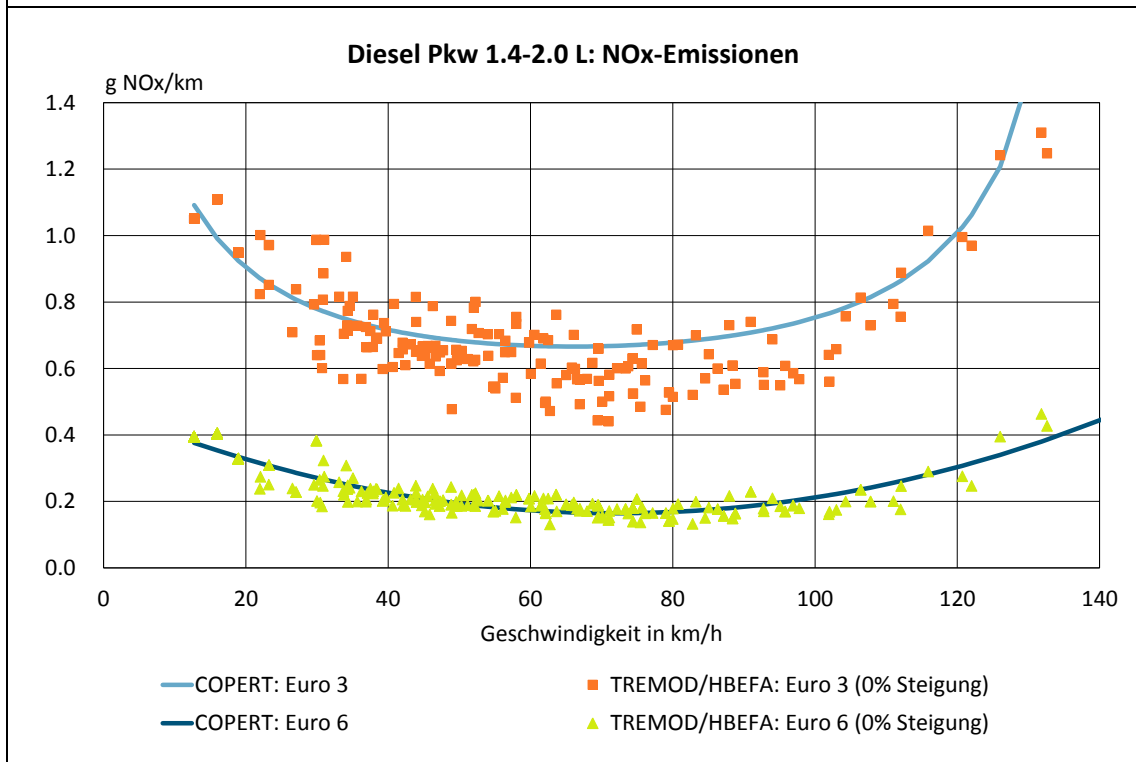
- **Gruppe 3:** Schadstoffe, für welche eine vereinfachte Methodik angewandt wird, hauptsächlich aufgrund des Fehlens detaillierter Daten (PAHs und POPs, Dioxine und Furane, PCBs und HCB)
- **Gruppe 4:** Schadstoffe, welche als Anteil der gesamten NMHC-Emissionen berechnet werden (Alkane, Alkene, Aldehyde, Ketone, Zykoalkane, aromatische Verbindungen).

Die Emissionsfaktoren von COPERT basieren grundsätzlich auf empirischen Messprogrammen. In diesen werden Fahrzeuge in Real-World-Fahrzyklen auf Prüfständen vermessen und dabei modale und/oder „Bag“-Messdaten erfasst. Für die warmen Emissionsfaktoren werden durchschnittliche Emissionsfaktoren zu den Durchschnittsgeschwindigkeiten der vordefinierten Fahrzyklen in Beziehung gesetzt. Für andere Emissionsarten (z.B. Verdampfung, Non-exhaust oder Schwermetalle) werden andere Ansätze (SHED-Test, Immissionsmessungen nahe Straßen, Literaturrecherche etc.) verwendet (EMEP/EEA 2014). Die für die verschiedenen Emissionsarten angewendete Methodik ist in den folgenden Abschnitten detaillierter beschrieben.

#### **Warme Emissionsfaktoren**

Die warmen Emissionsfaktoren werden als Funktionen abhängig von Fahrzeugtyp (Kraftstoffart, Gewicht/Leistung, Emissionsstufe) und Durchschnittsgeschwindigkeit berechnet. Die entsprechenden Gleichungen wurden mittels Regressionsanalyse aus Wertepaaren von Emissionsfaktoren und Durchschnittsgeschwindigkeiten hergeleitet (vgl. Abbildung 3).

**Abbildung 3: Prinzip der Herleitung der COPERT Geschwindigkeits-Funktionen für Emissionsfaktoren im betriebswarmen Zustand auf der Basis von Emissionsfaktoren aus HBEFA und weiteren Messdaten**  
 Dargestellt für die NO<sub>x</sub>-Emissionen eines Diesel Pkw mit 1,4-2,0 L Hubraum.



Die Eingangsdaten dafür sind hauptsächlich die Emissionsfaktoren von HBEFA und die Durchschnittsgeschwindigkeiten der entsprechenden Verkehrssituationen. Diese wiederum basieren auf Messungen auf Rollenprüfständen aus verschiedenen Laboratorien in Europa, deren Resultate in einer Datenbank gesammelt wurden. Diese Arbeiten werden von der ERMES-Gruppe koordiniert (<http://www.ermes-group.eu>). Die Messdaten finden Eingang ins PHEM-Modell der Technischen Universität Graz, welches für jede Fahrzeugart und Emissionsstufe Motorenkennfelder (funktionale Beziehung zwischen Leistung, Drehzahl und Verbrauch bzw. Emissionen eines Motors) herleitet um damit die Emissionen für die Fahrprofile der HBEFA-Verkehrssituationen zu simulieren und die HBEFA-Emissionsfaktoren herzuleiten. Die Herleitung ist auch in Kapitel 5.5.5 beschrieben, da TREMOD mit HBEFA die gleiche Datenbasis für die warmen Emissionsfaktoren nutzt.

Die Unsicherheit der Emissionsfaktoren hängt demnach von der Variabilität der ursprünglich in die Berechnung eingegangenen Rollenprüfstandsmessungen in jeder Geschwindigkeitsklasse ab, welche wiederum je nach Schadstoff, Fahrzeugtyp, Emissionsstufe und Geschwindigkeitsklasse variiert (vgl. Kouridis et al. 2010). Die Standardabweichungen reichen von wenigen Prozent bis zum zweifachen des absoluten Emissionsfaktor-Wertes.

### **Kaltstart-Emissionsfaktoren**

Kaltstart-Emissionsfaktoren dienen zur Berechnung der zusätzlichen Emissionen während der Aufwärmphase eines Motors. Diese zusätzlichen Kaltstart-Emissionen kommen grundsätzlich bei allen Fahrzeugkategorien vor, werden in COPERT aber nur für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge berechnet. Das Fahrzeugalter wird dabei nicht berücksichtigt.

Die Kaltstartzuschläge werden in COPERT als Faktor, der das Verhältnis zwischen den Emissionen eines kalten und eines betriebswarmen Motors darstellt, auf die in der Aufwärmphase zurückgelegte Distanz angewendet. Diese Faktoren variieren von Land zu Land: Unterschiedliche durchschnittliche Fahrdistanzen führen zu unterschiedlichen Verhältnissen von Anzahl Kaltstarts und Fahrleistung, und unterschiedliche klimatische Bedingungen beeinflussen die Dauer der Aufwärmphase und damit den Anteil einer Fahrt mit kaltem Motor.

Die Kaltstartzuschläge in COPERT wurden basierend auf dem MEET-Projekt (TRL 1999) umfassend aufdatiert und sind eine Funktion von Durchschnittsgeschwindigkeit und Umgebungstemperatur. Zwei Geschwindigkeitsbereiche werden abgedeckt (5–25 km/h und 25–45 km/h). Dies reicht aus für die meisten Anwendungen, in welchen Kaltstartzuschläge nur auf dem Straßentyp „urban“ berücksichtigt werden.

### **Verdampfungsemissionen**

Verdampfungsemissionen von Kohlenwasserstoffen stammen hauptsächlich aus dem Tanksystem benzinbetriebener Fahrzeuge. Die Verdampfungsemissionen von Dieselfahrzeugen sind aufgrund der schwereren Kohlenwasserstoff-Verbindungen und der gegenüber benzinbetriebenen Fahrzeugen geringeren Flüchtigkeit des Dieselmotorkraftstoffs vernachlässigbar. Die wichtigsten Quellen von Verdampfungsemissionen sind Tankatmung durch die Abzugsöffnung sowie Durchdringung und Lecken der Tankwände. Drei Prozesse werden berücksichtigt: Tankatmung im Tagesrhythmus, Verdampfungsverluste während der Fahrt sowie Verdampfung nach Warm- bzw. Heißabstellen des Motors.

Die Emissionsfaktoren in COPERT sind abhängig vom Temperaturprofil und dem Fahr-/Parkmuster während eines durchschnittlichen Tages. Die Testprozedur SHED (Sealed Housing for Evaporative Determination) basierend auf der Richtlinie 91/441/EEC wurde für die Herleitung der Emissionsfaktoren angewendet (Mellios et al. 2012). Berechnete Werte sind in der Software für kontrollierte (d.h. mit Aktivkohlefallerüstete) und unkontrollierte Fahrzeuge enthalten.

Der Modellansatz für die Verdampfungsemissionen aus COPERT wird auch in HBEFA und damit in der Folge auch in TREMOD verwendet.

### Benutzerdefinierte Anpassung der Emissionsfaktoren

Der Benutzer kann in COPERT die vorgegebenen Parameter der Gleichungen für die warmen und Kaltstart-Emissionen frei ändern und auch für unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche verschiedene Modelle neu einführen. Es wird allerdings davon abgeraten, die vorgegebenen Formeln auf höhere Geschwindigkeitsbereiche als voreingestellt anzuwenden.

### 4.5.6. Emissionsberechnung

Flotten- und Aktivitätsdaten werden mit den entsprechenden Emissionsfaktoren multipliziert, um Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie Kraftstoffverbrauch zu berechnen (Zusammenstellung der Schadstoffe s. Kapitel 4.4.3). Generell entstehen in COPERT Emissionen aus zwei Quellen: a) Motorenemissionen, weiter unterteilt in betriebswarme Emissionen und Kaltstart-Zuschläge, und b) diffuse Quellen, wie NMHC-Emissionen aufgrund Verdampfung oder Feinstaubemissionen aus Reifen- oder Bremsabrieb.

### 4.5.7. Modellresultate/Outputs

Die Emissions-Outputs sind differenziert nach:

- Fahrzeugtyp (Segmentierung wie in Kap. 4.5.2 angegeben)
- Straßentyp (urban, ländlich, Autobahn)
- Emissionsart (warm, Kaltstart, Verdampfung, etc.)
- Jahr

Die Resultate können in den folgenden Formaten bzw. mit den folgenden Programmen angesehen und weiterverarbeitet werden:

- COPERT-GUI (Excel-ähnliche Tabellen)
- Via MS Access
- Export als:
  - Excel-Datei
  - DBF-Datei im Corinair-Format
  - XML-Datei im CRF-Format
  - Excel-Datei im NFR-Format
- Als Report (mit Kuchen- und Balkendiagrammen):
  - Nach Straßentyp (urban, ländlich, Autobahn)
  - Nach Emissionsart (warm, Kaltstart, Verdampfung, etc.)

## 4.6. Eingangsdaten und Quellen

### Eingangsdaten

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die in COPERT 4 benötigten **Inputdaten**:

Tabelle 3: Eingangsdaten für COPERT 4	
<b>Flotte/Aktivität</b>	Bestand und jährliche/kumulative Fahrleistungen (urban, ländlich, Autobahn)
<b>Fahrbedingungen</b>	Durchschnittsgeschwindigkeit (urban, ländlich, Autobahn)
<b>Längsneigung</b>	Neigungs-Korrekturfaktoren (-6, -4, -2, 0, +2, +4, +6%; nur für schwere Nutzfahrzeuge)
<b>Beladung</b>	Beladungsgrad (nur für schwere Nutzfahrzeuge)
<b>Klima</b>	Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit (durchschnittliche monatliche Maxima/Minima)
<b>Kraftstoffqualität</b>	Diverse Parameter wie RVP, Schwermetallgehalt, Schwefelgehalt, Cetanzahl, Dichte etc.
<b>Weitere</b>	Statistischer Kraftstoffverbrauch für die Kalibrierung

Die Genauigkeit dieser Eingangsdaten beeinflusst die Emissionsberechnung und die Qualität der Outputs, allerdings ist dieser Einfluss nicht für alle Arten von Eingangsdaten gleich groß. Der erste und wichtigste Schritt ist die Erzeugung belastbarer Bestandsdaten nach Fahrzeugtyp, Antriebstechnologie, Größenklasse und Emissionsstufe. Fahrleistungen und Geschwindigkeiten sind auch wichtig, werden aber oft als „weiche“ Parameter bezeichnet, da ihre Verfügbarkeit aus Statistiken oft beschränkt ist (daher können sie auch angepasst werden, um den Gesamt-Energieverbrauch zu korrigieren). Weitere Inputdaten wie Längsneigungen, Beladungsgrad, Klima- und Kraftstoffqualitätsparameter, sind meistens noch schwieriger zu beschaffen; für diese sind aber auch Schätzwerte hinreichend.

### Datenquellen

COPERT als Emissionsmodellierungs-Software enthält intern keine anwendungsbereiten Eingangsdaten; diese müssen vom Benutzer bereitgestellt werden; weiter ist COPERT nicht für Zukunftsszenarien konzipiert und enthält keine kalibrierten Baseline-Szenarien wie z.B. SIBYL oder TREMOD.

Die folgenden Quellen können verwendet werden, um einen Eingangsdatensatz für COPERT zu erstellen:

- Das (kostenpflichtige) SIBYL-Modell (vgl. Kapitel 4.1)
- COPERT Data: EMISIA bietet gebrauchsfertige und aktuelle Flotten- und Aktivitätsdatensätze für die Verwendung mit COPERT an (<http://emisiam.com/content/copert-data>). Diese beinhalten alle benötigten Informationen für einen kompletten Modellrun wie Bestand, jährliche

Fahrleistungen, Geschwindigkeit, Anteile an den Fahrmodi etc. Die Datensätze basieren auf zwei EU-Forschungsprojekten, welche von EMISIA und Partnerfirmen durchgeführt wurden: TRACCS (Papadimitriou et al. 2013) und FLEETS<sup>7</sup>. Sie decken die Periode 2007-2013 und alle EU28-Länder plus NO, CH, IS, TR, FYROM ab. Jährliche Updates sind vorgesehen, um die Datensätze aktuell zu halten. Die Daten für Deutschland bis 2010 in diesen Datensätzen basieren zu einem großen Teil auf den von ifeu zur Verfügung gestellten Aktivitätsdaten von TREMOD.

Um ein Emissionsinventar von Grund auf aufzubauen, müssen verschiedene offizielle und inoffizielle Statistiken verarbeitet werden (z.B. Eurostat, UNFCCC, nationale Statistiken, relevante Projekte und Studien, etc.), um einen Input-Datensatz für die Verwendung mit COPERT zu erstellen.

#### 4.7. Operationelle Aspekte

- **Betriebssystem:** 32-bit Microsoft Windows® (nicht konzipiert für Windows 3.x und ältere Betriebssysteme).
- **Weitere Systembedingungen:** Microsoft .NET Framework Version 1.1 muss vorinstalliert sein. Microsoft Access und Excel sind von Vorteil zur Bearbeitung von Inputs und Outputs, aber nicht notwendig für die Installation und den Betrieb von COPERT.
- **Programmiersprache und –umgebung:** Visual Basic, Microsoft Visual Studio .NET 2003®.
- **Schnittstellen:** Benutzerfreundlicher GUI (MS-Office-ähnlich) für den Import, Export und das Ansehen von Daten. Resultate können mit MS Access weiterverarbeitet und in verschiedene Formate exportiert werden (s. Kapitel 4.5.7)
- **Offizielle Website:** <http://emisiam.com/copert>
- **Updates:** Die nächste Version COPERT 5 ist für 2016 geplant (s. Kapitel 4.1).

#### 4.8. Zugang, Publikation und Dokumentation

COPERT ist öffentlich zugänglich. Das Modell ist nicht kostenpflichtig, lediglich eine Gratis-Lizenz muss erworben werden. Informationen zu Download, Forum, Methodik, Dokumentation, Versionen, Support etc. sind auf <http://emisiam.com/copert> zugänglich. Zusätzliche technische und methodische Details sind in diversen technischen Berichten und Journalbeiträgen veröffentlicht. COPERT wird gegenwärtig über 300-mal zitiert (vgl. Kapitel 4.3.2).

---

<sup>7</sup> [http://emisiam.com/sites/default/files/08RE0009V2\\_Fleets\\_Final.pdf](http://emisiam.com/sites/default/files/08RE0009V2_Fleets_Final.pdf).

## 5. Detailbeschreibung TREMOD

### 5.1. Geschichte und Einbettung

#### 5.1.1. Geschichte

Die gestiegenen Anforderungen an Umweltinformationen in Deutschland in den 1980er-Jahren erforderten eine differenzierte, wissenschaftlich fundierte und gesellschaftlich akzeptierte einheitliche Methoden- und Datenbasis für die Emissionsberechnung als wesentliche Methode zur Abschätzung der Bedeutung der Schadstoffemissionen des Verkehrs, ihrer zukünftigen Entwicklung sowie der Notwendigkeit und Wirkung von Minderungsmaßnahmen.

Ende der Achtziger-Jahre wurden deshalb mehr als 10 F+E-Vorhaben im Auftrag des Umwelt- und des Verkehrsressorts zur Erstellung von Daten zum Emissionsverhalten (z.B. RWTÜV 1993, TÜV Rheinland 1994, TÜV Rheinland 1995), zum Fahrverhalten und zur Fahrleistung (z.B. IVT 1993, IVT 1994, Heusch-Boesefeldt 1994a, Heusch-Boesefeldt 1994b) durchgeführt. Diese umfangreiche und komplexe Datenbasis erforderte geeignete Instrumentarien, um den Stand des Wissens auch für die Emissionsberechnung verfügbar zu machen.

Dazu wurde ein Berechnungsmodell für die verkehrsbedingten Emissionen aller Verkehrsträger benötigt. Deshalb veranlasste das Umweltbundesamt die Erstellung des „Transport Emission Model“ abgekürzt TREMOD. Dieses Modell ist eng verknüpft mit dem als PC-Datenbank realisiertem „Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr“ (HBEFA), welches die komplexe Datenbasis der Emissionsmessungen aufbereitet (aktuelle Version HBEFA 3.2, INFRAS 2014).

#### 5.1.2. Institutionelle Einbettung und Finanzierung

Die Finanzierung von TREMOD erfolgt zum Großteil projektgebunden, d.h. es gibt keine Grundfinanzierung. Die verschiedenen Auftraggeber und die jeweiligen finanzierten Arbeiten sind im Folgenden aufgelistet:

- UBA: Basisversion, mehrere Updates, jährliches Update für die Emissionsberichterstattung;
- BAST: Überarbeitung der Szenarienberechnung Straßenverkehr und der Oberfläche, jährliches Update der Fahrleistungen Straßenverkehr durch Implementierung der Ergebnisse aus Straßenverkehrszählungen und Dauerzählstationen;
- Implementierung von Fahrzeugbestandsdaten aus den Zulassungsstatistiken des KBAs;
- VDA: Rahmenvertrag UBA, Nutzung- und Wartungsvertrag, unregelmäßig;
- DB: Rahmenvertrag UBA, Nutzung- und Wartungsvertrag, jährlicher Beitrag zum Update der Bahndaten.

## 5.2. Modellentwickler

Die Entwicklung und kontinuierliche Aktualisierung von TREMOD wird vom **Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu)** durchgeführt. Das ifeu arbeitet als unabhängiges Forschungsinstitut in Form einer als gemeinnützig anerkannten GmbH. Die rund 60 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern verfügen zum Großteil über eine natur- oder umweltwissenschaftliche Ausbildung. Die Finanzierung erfolgt ausschließlich über projektbezogene Mittel, um eine parteipolitisch unabhängige und wirtschaftlich eigenständige ökologische Forschung zu ermöglichen. Etwa zwei Drittel der Forschungsprojekte und Begutachtungen werden von Ministerien aus Bund und Ländern, Kommunen, dem Umweltbundesamt oder anderen öffentlichen Körperschaften beauftragt. Ein Drittel der Aufträge stammt aus der freien Wirtschaft. Neben dem Bereich Verkehr und Transport betreibt ifeu Umweltforschung in den Arbeitsfeldern Abfallwirtschaft und Ressourcenschutz, Umweltbildung, Energie (und Erneuerbare Energien), Industrie und Produkte, Ernährung und Biomasse, Nachhaltigkeit, Ökobilanzierung, Risikobewertung Umweltverträglichkeitsprüfung und Strategische Umweltprüfung.

Durch die Ankopplung von TREMOD an HBEFA besteht ein enger Austausch mit **INFRAS**, den Entwicklern von HBEFA. ifeu erhält hierbei Zugriff auf HBEFA und übernimmt dessen Emissionsfaktoren in geeigneter, aggregierter Form in TREMOD. Umgekehrt nutzt HBEFA Aktivitätsdaten und Flottenzusammensetzungen von TREMOD zur Bereitstellung von länderspezifischen, gewichteten Emissionsfaktoren für Deutschland.

Die jährliche Aktualisierung und Weiterentwicklung von TREMOD erfolgt weiterhin in direktem Austausch mit dem deutschen **Umweltbundesamt (UBA)**, als zentralem Nutzer von TREMOD (s. Nutzer). Mit dem UBA werden u.a. die für die Emissionsberichtserstattung relevanten Daten, z.B. CO<sub>2</sub>-Faktoren für Kraftstoffe, und Ergebnisse abgestimmt. Weiterhin werden alle relevanten Annahmen für das TREND-Szenario<sup>8</sup> bis 2030 zusammen festgelegt.

Die **Deutsche Bahn** ist ebenfalls neben der Nutzung von TREMOD auch bei dessen Weiterentwicklung beteiligt. Vom DB Umweltzentrum werden jährlich Aktivitäts- und Emissionsdaten zum Schienenverkehr bereitgestellt.

Das **Öko-Institut** ist bei der Bereitstellung von Daten zum Luftverkehr für die nationale Emissionsberichtserstattung beteiligt.

## 5.3. Nutzer und Anwendungsfelder

### 5.3.1. Nutzer

Im Folgenden werden Nutzer genannt, welche über eine eigene Version von TREMOD verfügen. Darüber hinaus werden TREMOD-Daten und Ergebnisse von einer Reihe anderer Institutionen verwendet, welche unter „weitere Nutzer“ genannt sind:

---

<sup>8</sup> In der hier analysierten Version TREMOD 5.53 ist die Bezeichnung noch „BASIS-Szenario“



- **Bundesbehörden:** In Deutschland wird TREMOD von den folgenden Bundesbehörden genutzt:
  - Umweltbundesamt (UBA)
  - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)
  - Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- **Firmen und Verbände:** Unternehmen und Verbände, welche TREMOD nutzen, sind der Verband der deutschen Automobilindustrie (VDA) und z.T. dessen Mitgliedsfirmen (z.B. Daimler, VW) sowie die Deutsche Bahn AG.
- **Wissenschaftliche Nutzer:** Derzeit gibt es neben ifeu keine direkten Nutzer von TREMOD in wissenschaftlichen Einrichtungen.
- **Weitere Nutzer:** Verschiedene im Folgenden aufgeführte Institutionen nutzen nicht TREMOD direkt als Programm, aber dessen Daten und Ergebnisse, und sind daher indirekte Nutzer von TREMOD:
  - EU-Kommission: Bereitstellung des Verkehrsmengengerüsts „Deutschland“ für das „Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr“ und andere europäische Modelle und Projekte (COPERT, TREMOVE, TRACCS<sup>9</sup>)
  - Bereitstellung von Umweltkennzahlen für andere Datenbanken über jeweils nutzerspezifische Schnittstellen, Modelle und Berichte (z.B. Probas, Umweltdatenbank der Allianz Pro Schiene, Umweltbericht der DB)
  - Jährliche Aufbereitung und Bereitstellung der Ergebnisse für den Straßenverkehr in hoher Differenzierung für das Statistische Bundesamt (mit individueller Schnittstelle)

### 5.3.2. Anwendungsfelder

#### Monitoring, Inventare

Das Umweltbundesamt nutzt TREMOD, um Daten für verschiedene nationale und internationale Berichtserstellungsaufgaben bereitzustellen. TREMOD verfügt hierfür über eine speziell entwickelte Schnittstelle, um die Ergebnisse entsprechend den Anforderungen des „Zentralen Systems Emissionen (ZSE)“ des UBA zu erzeugen. Folgende Berichtserstellungspflichten werden mithilfe von TREMOD durchgeführt:

- Emissionsberichterstattung „Treibhausgase“ gemäß Klimarahmenkonvention ("Kyoto-Protokoll"), jährlich, siehe z.B. UBA (2014a);
- "Projektionsbericht" (Berichterstattung von Treibhausgas-Emissionsszenarien) gemäß Klimarahmenkonvention, alle zwei Jahre, ab 2014 voraussichtlich jährlich, siehe BMUB (2015);

---

<sup>9</sup> TRACCS war ein Projekt (2012-2013), finanziert durch die Europäische Kommission (DG CLIMA), das sich mit der Zusammenstellung von Verkehrsgrundlagedaten für die EU28 und weitere Europäische Länder befasste (Papadimitriou et al. 2013).

- Berichterstattung zur voraussichtlichen Netto-Treibhausgasemissionseinsparung aufgrund der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen gemäß EU Richtlinie 2009/28/EG;
- Emissionsberichterstattung "Luftschadstoffe" gemäß Genfer Luftreinhaltekonvention (jährlich);
- Emissionsberichterstattung "NEC-Richtlinie" (jährlich);
- "Daten zur Umwelt", "TERM"-Indikatoren für die Europäische Umweltagentur (ohne Szenarien);
- Nationales Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister (PRTR).

### **Zukunftsszenarien**

TREMOD wird für verschiedene Szenarienberechnungen zur Abbildung zukünftiger Entwicklungen und zur Bewertung von Maßnahmen verwendet. Hintergründe sind hierbei meist Ressortaufgaben des UBA, verschiedener Bundesministerien und anderer Institutionen:

- UBA Trendszenario als Referenzszenario für die Entwicklung des Verkehrs in Deutschland bis 2035
- Weitere Szenarien zur Maßnahmenbewertung (z.B. Mautgestaltung, Effekte neuer EURO-Stufen und weitere): ca. 5-10 Aktivitäten pro Jahr mit Zukunftsbezug, z.B.:
  - Szenarien für verschiedene Verkehrsträger und Kraftstoffoptionen im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS)
  - Entwicklung des Kraftstoffverbrauches und der Energiesteuereinnahmen in Deutschland für das Bundesministerium der Finanzen (BMF)
  - Überleitung der Ergebnisse von GermanHy nach TREMOD (NOW)
  - Interaktion Strom Wärme Verkehr (BMUB)
  - Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050 (UBA)
  - Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität (BMUB)
  - Renewbility (BMUB)
  - Wirtschaftliche Aspekte nichttechnischer Maßnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr (UBA)
  - Klimaschutz-Planer - Kommunalen Planungsassistent für Energie und Klimaschutz (BMUB)

### **Wirkungsabschätzungen**

TREMOD-Daten, sowohl für historische Bezugsjahre als auch Szenarien, wurden u.a. für folgende Projekte zur Berechnung regionaler bzw. lokaler Luftbelastungen durch den Verkehr verwendet:

- UBA-Projekte PAREST

- UBA-Projekt „Luftqualität 2020/2030 - Weiterentwicklung von Prognosen für Luftschadstoffe unter Berücksichtigung von Klimastrategien“
- Input für das GAINS-Modell (Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies) von IIASA

### **Andere Anwendungen**

Neben den genannten Anwendungsfeldern, wird TREMOD für die Beantwortung diverser Anfragen von Bürgern und Organisationen genutzt (ca. 50/Jahr bei UBA, 50/Jahr bei ifeu, weitere bei BAST).

### **Eignung**

Alle oben genannten Emissionsinventarberechnungen und darauf aufbauende Berichterstattungsaufgaben können direkt mit TREMOD durchgeführt werden. Die Emissionsdaten bilden eine Grundlage für weitere Analysen im Bezugsraum Deutschland, z.B. Impact Assessments (Luftschadstoffausbreitungssimulationen).

Eine wesentliche Stärke von TREMOD ist, dass das Modell speziell auf die Situation für Deutschland zugeschnitten ist. Die Eingangsdaten und Ergebnisse sind an die national verfügbaren Statistiken/Untersuchungen angepasst, wodurch eine möglichst genaue und detailgetreue Modellierung ermöglicht wird. Umgekehrt werden TREMOD-Ergebnisse in entsprechende Statistiken zurücküberführt (z.B. DESTATIS). Für die nationale Emissionsberichterstattung des UBA existiert eine eigene Schnittstelle, wodurch die Ergebnisse jedes Jahr direkt in das ZSE übernommen werden können. Durch die enge und regelmäßige Abstimmung der TREMOD-Nutzer mit dem ifeu können weiterhin strukturelle Änderungen, z.B. individuelle Ergebnisabfragen oder Vorgabewerte, welche in der Nutzeroberfläche von TREMOD nicht durchführbar sind, kurzfristig umgesetzt werden.

Da TREMOD speziell auf die deutsche Situation zurechtgeschnitten ist, kann TREMOD jedoch ohne die spezifischen Modellkenntnisse der TREMOD-Entwickler nur bedingt für Inventarberechnungen anderer Länder angewendet werden. Bedingt durch methodische Unterschiede können die Ergebnisse nicht direkt mit denen anderer Emissionsmodelle verglichen werden.

## **5.4. Systemgrenzen**

### **5.4.1. Verkehrsträger**

In TREMOD werden die Emissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland berechnet.

Diese umfassen die folgenden Verkehrsträger:

- Straßenverkehr (Personen- und Güterverkehr)
- Schienenverkehr (Personen- und Güterverkehr)

- Binnenschifffahrt (Güterverkehr)
- Luftverkehr (Personen- und Güterverkehr)

Für den in diesem Vorhaben geplante Modellvergleich liegt der Schwerpunkt auf dem Verkehrsträger Straßenverkehr. Entsprechende Detailausführungen beschränken sich deshalb auf diesen Teil von TREMOD.

#### 5.4.2. Fahrzeugkategorien und -technologien

Eine Übersicht der in TREMOD (Teil Straßenverkehr) berücksichtigten Fahrzeugkategorien und Technologien zeigt Tabelle 4:

Tabelle 4: Fahrzeugkategorien und –segmente in TREMOD (Teil Straßenverkehr)				
Fahrzeugkategorie	Größenklasse		Kraftstoff	Antriebsart
Kleinkrafträder (KKR)	Hubraum	<50 ccm	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Benzin</li> <li>▪ Ethanol*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Benzin 2-Takt</li> <li>▪ Benzin 4-Takt</li> </ul>
Krafträder (KR)	Hubraum	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ &lt;150 ccm</li> <li>▪ 150-250 ccm</li> <li>▪ 250-750 ccm</li> <li>▪ &gt;750 ccm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Benzin</li> <li>▪ Ethanol*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Benzin 2-Takt</li> <li>▪ Benzin 4-Takt</li> </ul>
Personenkraftwagen (Pkw)	Kaufsegmente	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Klein: Mini/ Kleinwagen</li> <li>▪ Mittel: Kompaktklasse/ Minivans</li> <li>▪ Groß: Mittelklasse/ Obere Mittelklasse/ Oberklasse/ Cabriolets/ Sportwagen/ Geländewagen/ SUV/ Großraumvans/ Wohnmobile/ sonstige</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Benzin</li> <li>▪ Ethanol*</li> <li>▪ Diesel</li> <li>▪ Biodiesel*</li> <li>▪ Erdgas</li> <li>▪ LPG</li> <li>▪ Strom</li> <li>▪ Wasserstoff</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Benzin 2-Takt</li> <li>▪ Benzin 4-Takt</li> <li>▪ Diesel</li> <li>▪ CNG</li> <li>▪ CNG/Benzin (Bifuel),</li> <li>▪ LPG/Benzin (Bifuel)</li> <li>▪ Hybrid Benzin(-elektr.)</li> <li>▪ Hybrid CNG(-elektr.)</li> <li>▪ Hybrid Diesel(-elektr.)</li> <li>▪ PHEV Benzin (-elektr.)</li> <li>▪ PHEV CNG (-elektr.)</li> <li>▪ PHEV Diesel (-elektr.)</li> <li>▪ Batterie-elekt. (BEV)</li> <li>▪ H2-Brennstoffzelle (FCEV)</li> </ul>
Leichte Nutzfahrzeuge (LNF)	Leergewicht	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ M-N1-I</li> <li>▪ N1-II</li> <li>▪ N1-III</li> </ul>	Analog zu Pkw	Analog zu Pkw
Schwere Nutzfahrzeuge (SNF): Lastkraftwagen (Lkw)/ Lastzüge (LZ)/ Sattelzüge (SZ)	zGGW	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 3,5-7,5 t</li> <li>▪ 7-12,5 t</li> <li>▪ 12-20 t</li> <li>▪ 20-28 t</li> <li>▪ 28-34 t</li> <li>▪ &gt;34 t</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diesel</li> <li>▪ Biodiesel*</li> <li>▪ Erdgas</li> <li>▪ Strom</li> <li>▪ Wasserstoff</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diesel</li> <li>▪ CNG</li> <li>▪ LNG</li> <li>▪ LNG/Diesel (Dual-Fuel)</li> <li>▪ Hybrid CNG(-elektr.)</li> <li>▪ Hybrid Diesel(-elektr.)</li> <li>▪ PHEV Diesel (-elektr.)</li> <li>▪ Hybridoberleitung (HO) Diesel/elektr.</li> <li>▪ E-Motor-Konzepte</li> <li>▪ Batterie-elekt. (BEV)</li> <li>▪ H2-Brennstoffzelle (FCEV)</li> </ul>
Busse: Linienbus (LBus)/ Reisebus (RBus)	zGGW	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ &lt;15 t</li> <li>▪ 15-18 t</li> <li>▪ &gt;18 t</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diesel</li> <li>▪ Biodiesel*</li> <li>▪ Erdgas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diesel</li> <li>▪ CNG</li> </ul>

Fahrzeugkategorie	Größenklasse	Kraftstoff	Antriebsart
Übrige Kraftfahrzeuge leicht (ÜKfzl)	Leergewicht <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ M-N1-I</li> <li>▪ N1-II</li> <li>▪ N1-III</li> <li>▪</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Benzin</li> <li>▪ Ethanol*</li> <li>▪ Diesel</li> <li>▪ Biodiesel*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Benzin</li> <li>▪ Diesel</li> </ul>
Übrige Kraftfahrzeuge schwer (ÜKfzs)	zGGW <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ &lt;3,5 t</li> <li>▪ 3,5-7,5 t</li> <li>▪ 7-12,5 t</li> <li>▪ 12-20 t</li> <li>▪ 20-28 t</li> <li>▪ 28-34 t</li> <li>▪ &gt;34 t</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diesel</li> <li>▪ Biodiesel*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diesel</li> </ul>

\* Für Ethanol und Biodiesel werden keine eigenen Antriebsarten unterschieden. Diese Kraftstoffe werden in TREMOD nur als Beimischungen zu Benzin und Diesel berücksichtigt. Abkürzungen: siehe Glossar.

Abkürzungen: zGGW – zulässiges Gesamtgewicht; SUV – sports utility vehicle; CNG – compressed natural gas; LNG – liquefied natural gas; PHEV – plug in hybrid electric vehicle; BEC – battery electric vehicle; FCEV – fuel cell electric vehicle.

### 5.4.3. Komponenten

Die für die Emissionsberechnung des Verkehrs verwendeten Emissionsfaktoren für die relevanten Abgaskomponenten lassen sich in folgende Kategorien unterteilen:

- **Kraftstoffabhängige Komponenten:** Zu den nicht limitierten Abgaskomponenten gehören Kohlenstoffdioxid und Schwefeldioxid. Bei den kraftstoffabhängigen Komponenten ergibt sich der Emissionsfaktor aus den Kraftstoffeigenschaften. Bei Kohlenstoffdioxid ist der Emissionsfaktor abhängig vom Kohlenstoffgehalt, bei Schwefeldioxid vom Schwefelgehalt im Kraftstoff. Beide werden bei der Verbrennung oxidiert zu CO<sub>2</sub> bzw. SO<sub>2</sub>. Weitere Komponenten aus unvollständiger Verbrennung, wie etwa CO, oxidieren in kurzer Zeit an der Luft ebenfalls zu CO<sub>2</sub>. Die CO<sub>2</sub>- und SO<sub>2</sub>-Faktoren werden daher stets unter Annahme einer vollständigen Oxidation angegeben.
- **Limitierte Abgaskomponenten:** Zu den limitierten Abgaskomponenten gehören Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) und abgasbedingte Partikelemissionen (PM – particulate matter bzw. PN – particle number). Für diese Komponenten sind die Emissionsmengen gesetzlich limitiert. Zur Kontrolle der Grenzwerteinhaltung und Emissionsmodellierung werden die Emissionen der Kraftfahrzeuge kontinuierlich europaweit gemessen und aufbereitet. Emissionsfaktoren für limitierte Komponenten liegen daher in hoher Differenzierung vor.
- **Abgeleitete Abgaskomponenten:** Enthalten sind einige differenzierte Kohlenwasserstoffkomponenten (Methan (CH<sub>4</sub>) und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC), Benzol, Toluol, Xylol). Leitkomponente sind die gesetzlich limitierten Kohlenwasserstoffemissionen. Da für die differenzierten Kohlenwasserstoffe keine kontinuierlichen Messungen vorliegen, werden

diese als Anteil an den Gesamt-Kohlenwasserstoffen (HC) abgeleitet. Seit der Version TREMOD 5.53 werden auch die Emissionen von Ruß bzw. Black Carbon (BC) als Anteil der Partikelmassemissionen bilanziert.

- **Nicht-Limitierte Abgaskomponenten:** In TREMOD enthalten sind als nicht-limitierte Abgaskomponenten Distickstoffmonoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). Auch für diese Komponenten liegen keine kontinuierlichen Messungen vor. Sie werden in HBEFA 3.2 und damit in TREMOD aus Untersuchungen von EMISIA [EMEP 2012] übernommen.
- **Schwermetalle und PAK** sind nicht in HBEFA und TREMOD enthalten und werden daher hier nicht weiter diskutiert.

#### 5.4.4. Umweltwirkungen

TREMOD berechnet sowohl direkte als auch indirekte Emissionen. Direkte Emissionen („tank-to-wheel“) beinhalten die „Auspuffemissionen“ am Fahrzeug, sowie Emissionen durch Tankatmung und Verdunstungsemissionen im Fahrbetrieb (sog. „Running Losses“). Indirekte Emissionen („well-to-tank“) schließen alle Prozesse aus der gesamten Kraftstoffbereitstellungskette, also der Produktion, Verarbeitung, dem Transport und der Verteilung von Kraftstoffen mit ein. Emissionen für die Herstellung und Entsorgung von Fahrzeugen werden in TREMOD bislang nicht bilanziert.

#### 5.4.5. Räumliche Auflösung

Im Straßenverkehr werden ausschließlich nationale Emissionsmengen berechnet. Eine differenziertere räumliche Zuordnung findet nicht statt. Jedoch werden die Emissionen differenziert für verschiedene Straßenkategorien und Straßentypen berechnet. Grundsätzlich sind Berechnungen auch für Teile Deutschlands (Länder, Städte) möglich, aufbereitete Aktivitätsdaten liegen im Modell aber nur für ganz Deutschland vor.

Regionalisierte Ergebnisse werden in vorgeschalteten Programmen für den Luftverkehr (TREMOD-AV) und die Binnenschifffahrt (TREMOD-NA) berechnet. Im Luftverkehr findet eine Differenzierung nach Flughafenstandorten (nur LTO-Emissionen), Flugzeugtypen und Flugzyklen und damit Flughöhen statt. Die Binnenschifffahrt wird nach Schiffstypen, Gütergruppen, Flaggen und Wasserstraßenabschnitten differenziert.

#### 5.4.6. Zeitliche Auflösung

Die Berechnung erfolgt in Jahresbilanzen und umfasst historische Zeitreihen von 1950 bis heute, welche auf Realdaten basieren („Realjahre“), sowie Szenarien bis 2050 zur Abbildung von Trendentwicklungen oder Maßnahmen. Eine weitere zeitliche Differenzierung, z.B. nach Jahreszeiten, Monaten, Wochen- und Tagesgängen, wird nicht vorgenommen.

### 5.4.7. Geografische Abdeckung

Die Ergebnisse von TREMOD werden grundsätzlich für Deutschland berechnet. Im Luftverkehr erfolgt die Abgrenzung nach dem Standortprinzip. Darin werden der inländische Flugverkehr sowie alle aus Deutschland abgehenden Flüge (nicht die ankommenden) bilanziert.

## 5.5. Methodik (Straßenverkehr)

### 5.5.1. Überblick

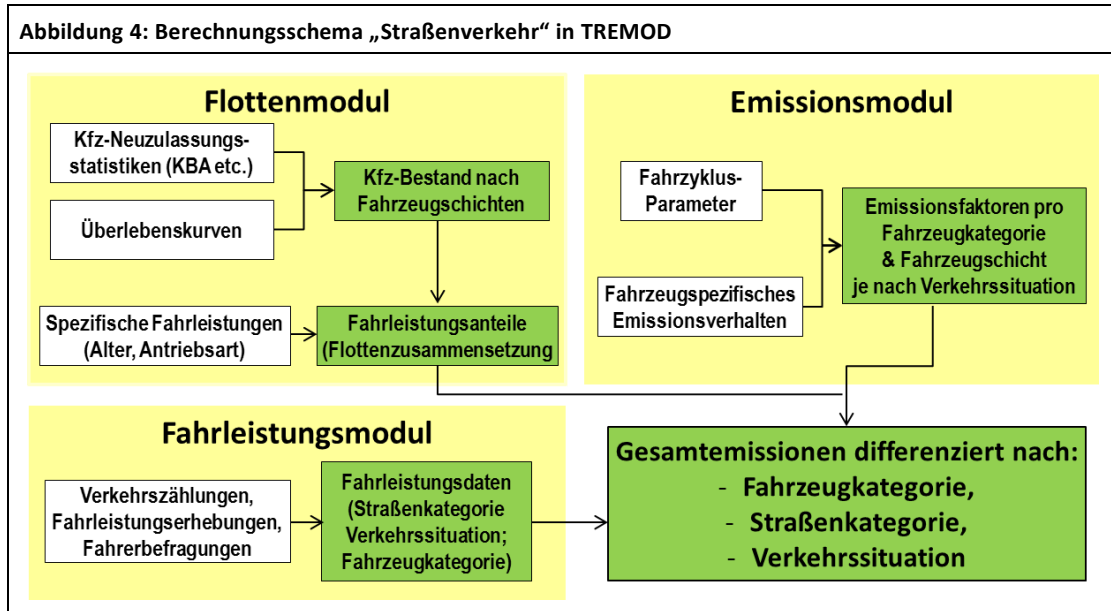
Grundlagen der Emissionsberechnungen für alle Verkehrsträger in TREMOD sind umfangreiche, nationale und internationale Datenquellen zu den Aktivitätsdaten (Fahrzeugbestände, Fahr- und Verkehrsleistungen, Kraftstoffabsatz) und spezifischen Verbrauchs- und Emissionsfaktoren. TREMOD ist eng verknüpft mit dem als PC-Datenbank realisierten "Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr" (HBEFA), welches die komplexe Datenbasis der Emissionsmessungen aufbereitet und repräsentative Emissionsfaktoren für alle Fahrzeugkategorien sowohl in hoher Auflösung für relevante Fahrzeugschichten und Verkehrssituationen als auch aggregiert (z.B. mittlerer Emissionsfaktor für Pkw in Deutschland im Jahr 2010) bereitstellt. Die aktuelle TREMOD-Version 5.53 beruht auf dem HBEFA 3.2.

Die Berechnung der Emissionen unterscheidet sich im Differenzierungsgrad und der grundsätzlichen Methodik zwischen den einzelnen Verkehrsträgern. Beispielhaft ist in der folgenden Abbildung der Berechnungsablauf für den Straßenverkehr dargestellt. Sie besteht aus folgenden Elementen:

- **Flottenmodul:** Der differenzierte Fahrzeugbestand wird aus der KBA-Statistik (Realbestand) entnommen oder mittels eines Umschichtungsmodells aus Neuzulassungen und Überlebenskurven für künftige Jahre berechnet (Szenarien). Anschließend wird der Bestand mit Kennzahlen zur mittleren Fahrleistung der verschiedenen Fahrzeugschichten verknüpft. Man erhält so eine differenzierte jährliche Fahrleistungsverteilung der Fahrzeugflotte für jede Fahrzeugkategorie.
- **Fahrleistungsmodul:** Die jährlichen Gesamtfahrleistungen je Fahrzeugkategorie werden mit geeigneten empirischen Informationen oder Annahmen auf die Straßenkategorien aufgeteilt und innerhalb jeder Straßenkategorie weiter auf die Verkehrssituationen, für die die Emissionsfaktoren vorliegen.
- **Emissionsmodul:** Im Emissionsmodul werden die Emissionsfaktoren aus HBEFA so aufbereitet, dass sie mit den differenzierten Fahrleistungen aus dem Fahrleistungsmodul und Fahrleistungsanteilen der Flotte aus dem Flottenmodul verknüpft werden können.

Durch Verknüpfung aller Informationen ergeben sich die jährlichen Gesamtemissionen sowohl aggregiert als auch in hoher Differenzierung.





[Quelle: IFEU]

Grundsätzlich werden zwei Arten von Ergebnissen für die Gesamtemissionen produziert:

- Energieverbrauch und Emissionen im Inland: Die Inlandsemissionen werden grundsätzlich Bottom-Up auf Basis der im Inland erbrachten Fahr- und Verkehrsleistungen berechnet.
- Energieverbrauch und Emissionen für die Emissionsberichterstattung: Die Emissionen für den nationalen Inventarbericht (z.B. UBA 2014a) werden für den Sektor „Verkehr“, analog zu den anderen Sektoren, auf Basis des inländischen Kraftstoffabsatzes bzw. Stromverbrauchs berechnet. Die hierfür relevante Größe ist der in den Energiebilanzen aufgeführte Endenergieverbrauch des Sektors „Verkehr“. Die Emissionsmengen je Verkehrsträger und Kraftstoff nach dem Inlandsprinzip werden entsprechen der Energiebilanz korrigiert.

Die Eingangsdaten und die Methodik für den Straßenverkehr werden in den folgenden Kapiteln im Detail beschrieben.

### 5.5.2. Fahrzeugflotte

Zur Bestimmung der Flottenzusammensetzung des Straßenverkehrs wird ein repräsentativer Bestand pro Bezugsjahr benötigt, gegliedert nach den Merkmalen:

- Fahrzeugkategorie (Pkw, LNF, Lkw etc.)
- Antriebsart (Otto, Diesel, CNG, LPG, Elektro, andere)
- Größenklasse (unterschiedliche Parameter je Fahrzeugkategorie)
- Fahrzeugalter
- Baujahr/ Emissionsstufe

Ein Fahrzeugsegment bildet sich hierbei aus den Merkmalen Fahrzeugkategorie, Größenklasse und Antriebsart (siehe hierzu Tabelle 4 in Kapitel 5.4.2). Prinzipiell können für alle vorhandenen Antriebs- und Kraftstoffarten Aktivitätsdaten eingegeben werden, um individuelle Szenarien zu berechnen. Für die historischen Bezugsjahre (Realjahre) wird nur ein Teil aller Antriebsarten berücksichtigt, wie in Tabelle 5 verdeutlicht.

Fahrzeugkategorie	Otto	Diesel	Erdgas	LPG	Strom	Wasserstoff
MZR (KR, KKR)						
Pkw			≥2006	≥2001	≥2013	
LNF			≥2006	≥2006	≥2013	
SNF						
Busse			≥2006			

**Grün:** Betrachtung in Realjahren, **Orange:** Betrachtung in Szenarien möglich

Ein Fahrzeugsegment bildet zusammen mit dem Merkmal Emissionsstufe eine Fahrzeugschicht. Die Fahrzeugschichten bilden hierbei die Schnittstelle zwischen dem Flotten-, Fahrleistungs- und Emissionsmodul in TREMOD und sind kompatibel zu den Fahrzeugschichten in HBEFA.

Die Emissionsstufen richten sich an der jeweiligen pro Fahrzeugkategorie gültigen europäischen Abgasgesetzgebung aus, z.B. Euro 1-Euro 6 für Pkw und LNF sowie Euro I bis Euro VI für SNF und Busse. Benzin- und Dieselfahrzeuge vor Euro 1/I werden z.T. in weitere Emissionsstufen differenziert (siehe Tabelle 6).

Darüber hinaus können die Anteile folgender Technologien differenziert werden:

- Ausstattung mit Dieselpartikelfiltern;
- Abgasminderungstechnologie EGR (exhaust gas recirculation) bzw. SCR (selective catalytic reduction) bei schweren Nutzfahrzeugen ab Euro IV;
- Ausstattung mit Klimaanlage bei Pkw.

Tabelle 6: Berücksichtigte Emissionsstufen pro Fahrzeugkategorie in TREMOD					
MZR alle	Pkw Benzin	Pkw Diesel*	LNF Benzin	LNF Diesel*	SNF und Busse Diesel*
	Euro 6/6c		Euro 6/6c		Euro VI
Euro 5	Euro 5		Euro 5		Euro V SCR, Euro V EGR
Euro 4	Euro 4		Euro 4		Euro IV SCR, Euro IV EGR
Euro 3	Euro 3		Euro 3		Euro III
Euro 2	Euro 2		Euro 2		Euro II
Euro 1	Euro 1		Euro 1		Euro I
Konventionell	GKat 1987-90	1986-1988	Konv>81	Anl XIII	80ies
	GKat vor 1987	<1986	Konv<81	<1986	70ies
	Ukat				60ies
	Konv. Sonstige (red.)				50ies
	ECE-15'04				
	ECE-15'03				
	ECE-15'01/02				
	ECE-15'00				
	<ECE				

\* Bei Diesel-Fahrzeugen bis Euro 4/IV ist weiterhin eine Unterscheidung in mit/ohne Partikelfilter (DPF) möglich.

Die Zuordnung der Fahrzeugflotte zu den Fahrzeugschichten wird über deren Anteil am jährlichen Fahrzeugbestand vorgegeben. Als repräsentativ für die Flottenzusammensetzung eines Jahres wird der Bestand zur Jahresmitte angenommen.

Für **historische Jahre** werden die Anteile der Fahrzeugsegmente (Größenklasse und Antrieb) pro Fahrzeugkategorie aus den statistischen Daten des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) abgeleitet. Dies gilt auch für die Zusammensetzung der Emissionsstufen, welche vom KBA erfasst wird. Die Daten werden jedoch in eine für TREMOD geeignete Form aufbereitet, wobei u.a. folgende Schritte durchgeführt werden:

- Aggregation der Antriebs-/ Kraftstoffarten entsprechend. Dabei werden z.B. Antriebsarten mit geringem Anteil am Bestand, z.B. „großer Brennstoffzellen-Pkw“ im Jahr 2013, mit den vorhandenen Antriebsarten, in diesem Fall „großer Benzin-Pkw“, zusammengefasst.
- Aggregation der Verteilung der Emissionsstufen nach Baujahr. So werden unplausible Emissionsstufen, welche in der Statistik vorkommen können, z.B. Otto-Pkw mit Baujahr 1959 „Euro 2“, einer für diesen Zeitraum wahrscheinlichen Stufe, z.B. Otto-Pkw mit Baujahr 1959 vor ECE“, zugeordnet.

- Unterteilung der Fahrzeugflotte nach zusätzlichen Parametern, welche nicht in der Bestandsstatistik enthalten sind, z.B. Ausstattung EGR, SCR, DPF, Klimaanlage.

Für Bezugsjahre in Zukunftsszenarien verwendet TREMOD ein Flottenumschichtungsmodell auf Basis des heutigen Bestands, der jährlichen Neuzulassungen und von Überlebensfunktionen. Die Neuzulassungen und Überlebensfunktionen können dabei je Größenklasse und Antriebsart definiert werden.

### 5.5.3. Verkehrsaktivitäten und andere Parameter

In TREMOD wird zur Ableitung des Fahrleistungsgerüsts die Inlandsfahrleistung, also die jährlich innerhalb Deutschlands zurückgelegten Kilometer, zugrunde gelegt. Die Fahrleistungen werden zur Emissionsberechnung differenziert nach:

- Straßentypen
- Fahrzeugkategorien
- Fahrzeugschichten
- Verkehrssituationen
- Längsneigungsklassen

Für die Berechnung der Fahrleistungen und Emissionen bestehen mehrere Ebenen, um die Fahrleistung zu definieren.

#### **Gesamtfahrleistung nach Straßen- und Fahrzeugkategorien**

Für die Berechnung eines Bezugsjahres wird in der Regel die Fahrleistung nach Straßen- und Fahrzeugkategorie verwendet. Diese Daten werden im Rahmen von verschiedenen Statistiken regelmäßig veröffentlicht und laufend in TREMOD aktualisiert (siehe Datenquellen in Kapitel 5.6.2).

- **Straßenkategorien:** Die Fahrleistung wird in TREMOD nach den drei Straßenkategorien „Autobahn“, „sonstige Außerortsstraßen“ und „Innerortsstraßen“ sowie nach Straßentypen differenziert, analog zur Systematik der BAST.

Die Fahrleistungen auf den Bundesautobahnen werden zusätzlich nach der Anzahl der Fahrstreifen unterschieden. Dazu werden die zwei Kategorien  $\leq 5$  und  $\geq 6$  Fahrstreifen gebildet. Die sonstigen Außerortstraßen werden nach Bundes-, Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen unterschieden. Die Innerortsstraßen werden nicht weiter unterteilt. Tabelle 7 fasst die verwendeten Kategorien zusammen.

Tabelle 7: Straßenkategorien und Straßentypen				
Straßenkategorie		Straßentyp		Beschreibung
AB	Bundesautobahnen	A<=5	<= 5 Fahrstreifen	
		A>=6	>= 6 Fahrstreifen	
AO	sonstige Außerortsstraßen	B	Bundesstraßen	Freie Strecken
		L	Landesstraßen	
		K	Kreisstraßen	
		G	Gemeindestraßen	
		L	Landesstraßen	
IO	Innerortsstraßen	I	Innerortsstraßen	Alle Innerortsstraßen inkl. Ortsdurchfahrten der B-, L-, K- und G-Straßen

- **Fahrzeugkategorien:** Die Unterteilung nach Fahrzeugkategorien (FzKat) wird so gewählt, dass zum einen die statistische Datenbasis (Bestände, Fahrleistungen) und zum anderen die Emissionsfaktoren-Datenbasis in ausreichender Differenzierung abgebildet werden. Daher werden drei verschiedene Kategorien gewählt:
  - FzKat (KBA): Fahrzeugkategorien entsprechend der Bestandsstatistik des Kraftfahrt-Bundesamtes.
  - FzKat (TREMODO): Fahrzeugkategorien entsprechend der Emissionsfaktoren-Datenbasis in TREMOD.
  - FzKat (SVZ): Fahrzeugkategorien entsprechend der Unterteilung in den Straßenverkehrszählungen (SVZ).

Tabelle 8 gibt einen Überblick über die Fahrzeugkategorien. Die TREMOD-Aufteilung entspricht der KBA-Systematik, wobei einzelne Kategorien (Busse, Lkw, übrige Kfz) entsprechend den Anforderungen der Emissionsberechnung weiter untergliedert sind. Bei den im Fünf-Jahresrhythmus stattfindenden Straßenverkehrszählungen werden sechs Kategorien erfasst. Im Rahmen der automatischen Dauerzählstellen (jährliche Publikation) werden die beiden Kategorien Leicht- und Schwerverkehr erfasst.

Tabelle 8: Definition und Zuordnung der Fahrzeugkategorien				
KBA	TREMOD		SVZ	
(Kleinkrafträder)	Kleinkrafträder	KKR	KRäder	Leichtverkehr (LV)
Krafträder	Krafträder	KR		
Pkw/Kombi	Pkw/Kombi	Pkw	Pkw	Leichtverkehr (LV)
Übrige Kfz	Wohnmobile <3,5 t	Wml (bis 2004), Pkw (ab 2005)		
	übrige Kfz <3,5 t	UeKfzl		
Busse	Linienbusse	LBus	Busse	Schwerverkehr (SV)
	Reisebusse	RBus		
Lkw	Lkw <3,5 t	Lkwl	Lkw <3,5 t	Leichtverkehr (LV)
	Lkw Solo > 3,5 t	Lkws	Lkw ohne Anhänger	Schwerverkehr (SV)
	Lastzüge	LZ	Lastzüge	Schwerverkehr (SV)
Sattelzugmaschinen	Sattelzüge	SZ		
Übrige Kfz	Wohnmobile >3,5 t	Wms (bis 2004)	Lkw ohne Anhänger	Schwerverkehr (SV)
	übrige Kfz > 3,5 t	UeKfzs		

### Aufteilung nach Fahrzeugschichten und Verkehrssituationen

Um eine Zuordnung zu den spezifischen Emissionsfaktoren im Emissionsmodul zu ermöglichen, werden die Gesamtfahrleistungen pro Straßen- und Fahrzeugkategorie weiter nach Fahrzeugschichten und Verkehrssituationen differenziert. Hierfür werden folgende Funktionen bzw. Verteilungen genutzt:

- Aufteilung des Fahrzeugbestandes nach Fahrzeugschichten (Größenklassen, Antrieb, Alter)
- Fahrleistungsrelationen pro Fahrzeugsegment (Größenklasse, Antrieb) und Straßenkategorie
- Fahrleistungsverteilung nach Fahrzeugalter
- Fahrleistungsverteilung pro Fahrzeug- und Straßenkategorie auf Verkehrssituationen

Die Aufteilung des Fahrzeugbestandes nach Fahrzeugschichten und nach aktuellem Bezugsjahr wird wie bereits im Kapitel 5.5.2 beschrieben durchgeführt.

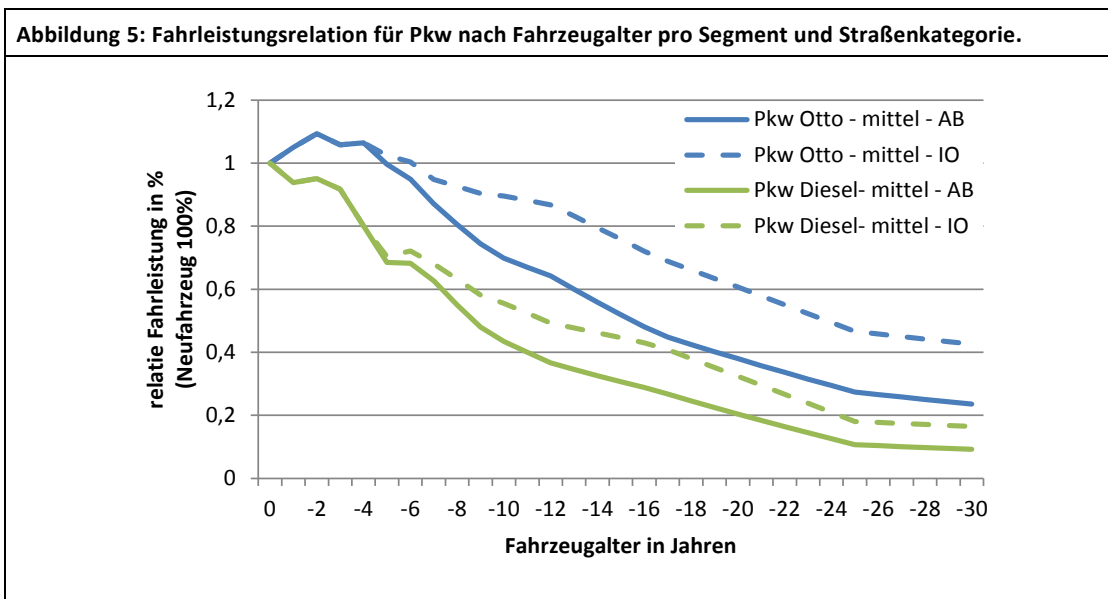
Tabelle 9 zeigt beispielhaft die Fahrleistungsrelationen der Pkw im Jahr 2010. Zum Beispiel wird angenommen, dass ein großer Diesel-Pkw auf Autobahnen eine um den Faktor 3,78 höhere Fahrleistung als ein kleiner Otto-Pkw hat, auf den übrigen Straßen liegt diese nur um den Faktor 1,84 höher.

**Tabelle 9: Fahrleistungsrelationen der Pkw-Segmente nach Straßenkategorien und mittlere Jahresfahrleistung im Jahr 2010.**

Segment	Autobahn	Übrige Straßen
Pkw Otto klein	1,00	1,00
Pkw Otto mittel	1,75	1,06
Pkw Otto groß	3,12	0,93
Diesel klein	1,16	1,16
Diesel mittel	3,17	2,02
Diesel groß	3,78	1,84

Quellen: IVT 2004, Abschätzungen des IFEU

Die Fahrleistungsrelationen in TREMOD leiten sich i.d.R. aus Einzeluntersuchungen ab und werden nicht für jedes Bezugsjahr aktualisiert (siehe Kapitel 5.6.2). Dasselbe gilt für die Verteilung der Fahrleistungsgewichtung nach Fahrzeualter. Hierbei wird berücksichtigt, dass die Fahrleistung mit steigendem Fahrzeualter abnimmt. Dieser Effekt ist bei Diesel-Pkw stärker als bei Otto-Pkw und auf Autobahnen stärker als im Innerortsverkehr (Abbildung 5).



[Quelle: IFEU]

### Verkehrssituationen

In TREMOD werden Anteile an der Fahrleistung pro Fahrzeug- und Straßenkategorie nach Verkehrssituationen hinterlegt. Die Verkehrssituationen entsprechen hierbei der Systematik für die Emissionsfaktoren in HBEFA und beschreiben Fahrprofile für verschiedene Straßenkategorien, Geschwindigkeitsbegrenzungen und Verkehrszustände (siehe Abbildung 6).

**Abbildung 6: Verkehrssituationen in HBEFA 3.2.**

Gebiet	Strassentyp	Verkehrszustand	Tempo-Limit [km/h]															
			30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	>130				
laendlich gepraegt	Autobahn	4 VZustaende																
	Semi-Autobahn	4 VZustaende																
	Fern-, Bundesstrasse	4 VZustaende																
	Hauptverkehrsstrasse	4 VZustaende																
	Hauptverkehrsstrasse, kurvig	4 VZustaende																
	Sammelstrasse	4 VZustaende																
	Sammelstrasse, kurvig	4 VZustaende																
	Erschliessungsstrasse	4 VZustaende																
Agglo- meration	Autobahn	4 VZustaende																
	Stadt-Autobahn	4 VZustaende																
	Fern-, Bundesstrasse	4 VZustaende																
	Staedt. Maerstr. / Ringstr.	4 VZustaende																
	Hauptverkehrsstrasse	4 VZustaende																
	Sammelstrasse	4 VZustaende																
	Erschliessungsstrasse	4 VZustaende																

Zugeordneter Flottenmix-Typ:  
 = Autobahn  
 = Land  
 = Agglo.

[Quelle: INFRAS 2014]

Für die praktische Anwendung ist von Relevanz, wie hoch der Fahrleistungsanteil je Verkehrssituation und Straßenkategorie ist. Hierfür werden Fahrleistungsanteile je Verkehrssituation pro Straßen- und Fahrzeugkategorien angenommen. Diese werden in HBEFA für die mittleren Emissionsfaktoren für Deutschland hinterlegt und in TREMOD als mittlere Emissionsfaktoren pro Fahrzeugschicht und Straßentyp übernommen.

### Längsneigungsklassen

Ein weiteres emissionsrelevantes Merkmal ist die Längsneigung. Hierzu werden verschiedene Längsneigungsklassen definiert, für die die entsprechenden Emissionsfaktoren in HBEFA abgeleitet werden und für die entsprechende Fahrleistungsanteile ermittelt werden müssen. Die Unterteilung nach Längsneigungsklassen wird wie in Tabelle 10 angegeben festgelegt:

Ebene	Steigung	Gefälle
-1% bis +1%	1% bis 3%	-1% bis -3%
	3% bis 5%	-3% bis -5%
	>5%	<-5%



### **Energiearten**

Bei alternativen Antrieben mit mehreren Energiearten, z.B. Plug-In-Hybriden, wird zusätzlich eine Aufteilung nach Energiearten, z.B. Strom/Benzin definiert.

### **Verkehrsleistungen und Fahrleistung in Szenarien**

TREMOD gibt zusätzlich zur Fahrleistung (km) auch Verkehrsleistungen (Personen-km; Tonnen-km) als Ergebnis aus. Diese stehen in Zusammenhang mit der Fahrleistung, den Transportkapazitäten (z.B. max. Zuladung, Passagierplätze) und der mittleren Auslastung.

Im Trendszenario und in Maßnahmenszenarien dient die Verkehrsleistung als Eingangsparameter zu Errechnung der Gesamtfahrleistung. Hierfür werden in der Regel auch offizielle Verkehrsprognosen wie die der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP) zugrunde gelegt. Die Fahrleistung ergibt sich dann durch die Veränderung der Flotte und der mittleren Auslastung.

## **5.5.4. Energieverbrauch**

### **Prinzip der Bottom-Up-Berechnung**

Der Kraftstoffverbrauch nach dem Inlandsprinzip wird analog zu den Emissionen Bottom-Up berechnet, indem die Fahrleistungen pro Fahrzeugschicht und Verkehrssituation mit dem dazugehörigen spezifischen Kraftstoffverbrauch pro km multipliziert werden.

Der spezifische Energieverbrauch der Kraftfahrzeuge in TREMOD basiert auf den im HBEFA vorgegebenen Verbrauchsfaktoren der Fahrzeugschichten, die mit dem PHEM-Modell der TU Graz für die Verkehrssituationen im realen Fahrbetrieb ermittelt wurden (TU Graz 2009).

Für Pkw sind diese Werte allerdings nicht genau genug, da sich die bei der Messung verwendeten Fahrzeuge für eine Emissionsschicht aus Fahrzeugen mehrerer Baujahre zusammensetzen und die relativ geringe Anzahl an Fahrzeugen nicht repräsentativ für den Verbrauch ist.

Aus diesem Grund erfolgt in HBEFA 3.2 eine länderspezifische Anpassung der Verbrauchswerte. Grundlage sind die im CO<sub>2</sub>-Monitoring dokumentierten Verbrauchswerte der Fahrzeugflotten und deren länderspezifischen Unterschiede. Mithilfe dieser Flottenwerte wird

- eine Korrektur vom HBEFA-Messkollektiv auf die Deutsche Pkw-Flotte (Basiskorrektur) und
- die Entwicklung im Zeitverlauf auf Basis der Pkw-Neuzulassungen in Deutschland durchgeführt (Jahreskorrektur).

### **Umsetzung in TREMOD**

Durch die Umstellung von Hubraumklassen auf Kaufsegmentklassen, die in HBEFA 3.2 nicht enthalten ist, mussten in TREMOD neue Verbrauchswerte für Deutschland abgeleitet werden. Da TREMOD die Fahrleistungsdaten für Pkw aus dem DIW-Fahrleistungs- und Verbrauchsmodell übernimmt, wurden die TREMOD-Verbrauchswerte so geeicht, dass über die gesamte

Flotte der TREMOD-Verbrauch für Otto- und Diesel-Pkw mit den DIW-Werten übereinstimmt. Es zeigte sich, dass die in TREMOD und HBEFA getroffenen Annahmen über den zeitlichen Verlauf der Verbrauchsentwicklung der Neuzulassungen gut mit den DIW-Verbrauchswerten für die Gesamtflotte je Bezugsjahr zur Deckung zu bringen sind.

Im Einzelnen wurde wie folgt vorgegangen:

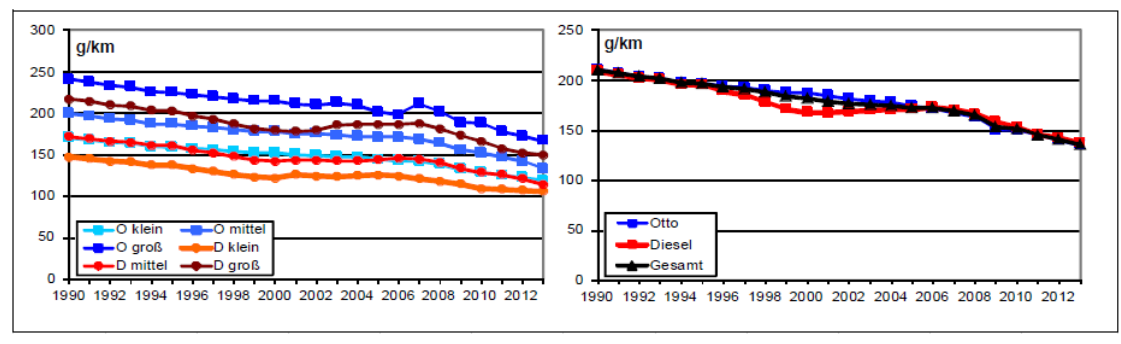
- **Anpassung der Basiswerte:** Die nach obigem Verfahren (Basiskorrektur) abgeleiteten Verbrauchswerte aus HBEFA für Otto- und Diesel-Pkw nach Hubraumklassen und Verkehrssituationen, basierend auf den Euro-3-Fahrzeugen mit Bezugsjahr 2002, wurden anhand der NEFZ-Monitoring-Ergebnisse mit den jeweiligen Relationen „Hubraumklasse zu Kaufsegmentklasse“ umgerechnet. Darin ist die Annahme enthalten, dass der Realverbrauch der Neufahrzeuge des Jahres 2002 nach Größenklassen in gleicher Relation steht wie die entsprechenden Verbrauchswerte nach NEFZ.

Der neue Basiswert wird für die TREMOD-Berechnungen ab 2006 verwendet. Für die Vorjahre bleibt der bisherige Ansatz mit der Differenzierung nach Hubraumklassen bestehen.

- **Entwicklung im Zeitverlauf:** Die Ableitung der Verbrauchswerte im Zeitverlauf folgt prinzipiell dem Vorgehen in HBEFA. Für die Entwicklung im Zeitverlauf wurde bis 2007, wie bisher, die relative Verbrauchsentwicklung je Größenklasse angesetzt. Im Unterschied zu HBEFA wird in TREMOD ab 2006 mit der Umstellung auf Kaufsegmente die Verbrauchsentwicklung nach Kaufsegmentklassen und nicht mehr nach Hubraumklassen verwendet. Diese bleibt jedoch weiterhin für die Jahre vor 2006 relevant.

Ab dem Zulassungsjahr 2008 nimmt der Verbrauch der Neuzulassungen im NEFZ deutlich stärker ab als in den Vorjahren (siehe Abbildung 7). Neuere Untersuchungen von ICCT (2013), aber auch die Verbrauchsmessungen des ADAC u.a. zeigen jedoch, dass der Realverbrauch in den vergangenen Jahren bei Neufahrzeugen deutlich weniger abgenommen hat als der Verbrauch im NEFZ. Um dies im Modell zu berücksichtigen, wird in TREMOD wie auch in HBEFA der Realverbrauch der Neuzulassungen zwischen 2008 und 2013 nur um die Hälfte der NEFZ-Verbrauchsminderung abgesenkt.

**Abbildung 7: CO<sub>2</sub>-Emissionen der neuzugelassenen Pkw in Deutschland von 1990-2013 im NEFZ nach Größenklassen (Kaufsegmente) und Antriebsart.**



[Quelle: IFEU]

Setzt man diese Annahmen um, ergibt sich noch eine Diskrepanz zwischen den TREMOD-Ergebnissen für die mittlere Otto- und Diesel-Pkw-Flotte und den DIW-Werten (siehe Tabelle 11). Eine weitgehende Übereinstimmung wird erreicht, indem die nach dem obigen Verfahren berechneten Basisfaktoren für Otto-Pkw um 2,25% reduziert und für Diesel-Pkw um 10% erhöht werden. Die Ableitung der Gesamtkorrektur für die Umrechnung der Basisverbrauchswerte der Neuzulassungen 2002 aus dem HBEFA nach Hubraumklassen in Basisverbrauchswerte nach Kaufsegmentklassen ist in Tabelle 11 dargestellt.

Pkw-Segment	NEFZ-Werte nach Hubraumklassen (CO <sub>2</sub> in g/km)	NEFZ-Werte nach Segmentklassen (CO <sub>2</sub> in g/km)	Korrektur NEFZ Segment / Hubraum	Korrektur Anpassung an DIW-Ergebnisse	Gesamtkorrektur
B klein	150,6	149,5	0,99	0,975 (-2,25%)	0,97
B mittel	187,9	176,0	0,94	0,975 (-2,25%)	0,91
B groß	252,7	210,1	0,83	0,975 (-2,25%)	0,81
D klein	101,9	124,5	1,22	1,1 (+10%)	1,34
D mittel	153,2	143,8	0,94	1,1 (+10%)	1,03
D groß	204,0	179,9	0,88	1,1 (+10%)	0,97

Quellen: Verkehr in Zahlen, KBA, TREMOD-Abschätzung

Mit den Basisverbrauchsfaktoren für die Neuzulassungen 2002 und den beschriebenen Effizienzentwicklungen der Neufahrzeuge ergeben sich in TREMOD für die mittlere Fahrzeugflotte für jedes Bezugsjahr mittlere Verbrauchsfaktoren, die mit den DIW-Ergebnissen übereinstimmen (siehe Tabelle 12).

Verbrauch (l/100 km)	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013*
D	6,9	6,9	6,8	6,8	6,8	6,7	6,7	6,7
B	8,3	8,2	8,1	8,0	7,9	7,9	7,8	7,7

Quellen: TREMOD und Verkehr in Zahlen bis 2012, \*2013: TREMOD-Berechnung

**Leichte Nutzfahrzeuge:** Für leichte Nutzfahrzeuge liegen erstmals für das Jahr 2012 von der EU veröffentlichte Monitoring-Werte vor (EEA 2015b). Die KBA-Auswertung für TREMOD berücksichtigt diese Werte erstmals für das Bezugsjahr 2013. Die mittleren CO<sub>2</sub>-Emissionen der leichten Nutzfahrzeuge in Deutschland lagen demzufolge im Jahr 2012 bei 195,5 g/km und 2013 bei 192,9 g/km (Minderung: -1,3%).

Der Realverbrauch in TREMOD, der sich mit den Verbrauchswerten des HBEFA ergibt, stimmt gut mit den berichteten NEFZ-Werten überein: Die TREMOD-Werte für den „Realverbrauch“ der mittleren Neuzulassungen liegen 2012 bei 220 g/km und 2013 bei 213 g/km und damit zwischen 10,1% und 11,6% höher als der NEFZ-Wert. Da, anders als bei den Pkw, keine weiteren Anhaltspunkte für eine größere Abweichung „Real“ vs. NEFZ vorliegen, werden die Verbrauchswerte von HBEFA unverändert übernommen.

**Übrige Fahrzeuge:** Bei den übrigen Fahrzeugkategorien wurden die spezifischen Energieverbrauchswerte für den Realbetrieb direkt aus dem HBEFA 3.2 übernommen. Diese wurden z.T. über Realmessungen verifiziert, z.B. bei den 40-Tonnen-Lkw (TU Graz 2002, TU Graz 2003).

Diese Mittelwerte aus TREMOD sind über die Fahrleistung und nicht über den Fahrzeugbestand gewichtet. Damit gehen nicht nur Änderungen in der Flottenzusammensetzung sondern auch Verschiebungen von Fahrleistungsanteilen zwischen den Straßenkategorien in den Mittelwert ein.

### **Vergleich des Kraftstoffabsatzes mit dem Inlandsverbrauch**

Eine wichtige Basis zur Bestimmung der verkehrsbedingten Emissionen ist der Energieverbrauch in Deutschland. Dieser wird von der AG Energiebilanzen statistisch erfasst und den verschiedenen Sektoren zugeordnet. Die Energiebilanz ist die Basis der Emissionsberichterstattung (UBA 2014a) und daher auch für die Berechnung der Emissionen in TREMOD relevant. Basis der Energiebilanz für die Kraftstoffe sind die Mengen, die in einem Jahr in Deutschland abgesetzt wurden.

Die Energiebilanz ist daher die wichtigste statistisch verfügbare Randgröße zur Überprüfung der mit TREMOD berechneten Ergebnisse, da alle anderen verwendeten Größen wie Fahrleistungen und spezifische Verbräuche mit mehr oder weniger großen Unsicherheiten behaftet sind.

Anders als im stationären Bereich ist im Verkehr der Ort des Verbrauchs nicht identisch mit dem Ort der Energieaufnahme. Außerdem treten zeitliche Differenzen auf, z.B. wenn zum Jahresende aufgrund angekündigter Preissteigerungen die Fahrzeugtanks gefüllt werden. Daher kommt es zu Differenzen zwischen den Absatzzahlen nach Energiebilanz und der im Inland verbrauchten Energie.

Da für die Emissionsberichterstattung das Energie- und Treibhausgasinventar nach den Absatzzahlen der Energiebilanz bestimmt wird, müssen die Bottom-Up-berechneten Inlandsergebnisse von TREMOD an die Top-Down-Absatzzahlen der Energiebilanz angepasst werden. Dazu werden Anpassungsfaktoren wie folgt ermittelt:

- Ottokraftstoff wird überwiegend von Pkw verbraucht (97%), gefolgt von MZR, leichten Nutzfahrzeugen und übrigen Kfz. Der Anpassungsfaktor für Ottokraftstoff wird daher als Quotient aus dem Absatz von Ottokraftstoff im Straßenverkehr und dem mit TREMOD berechneten Inlandsverbrauch der genannten Fahrzeugkategorien berechnet.
- Für Diesel-Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und übrige Fahrzeuge <3,5t wird der Anpassungsfaktor von Ottokraftstoff übernommen, da angenommen wird, dass bei diesen Fahrzeugkategorien die Differenzen zwischen Absatz und Verbrauch ähnliche Ursachen und daher eine ähnliche Größenordnung haben, unabhängig von der Antriebsenergie.
- Der Anpassungsfaktor für die übrigen dieselbetriebenen Fahrzeugkategorien (schwere Nutzfahrzeuge und Busse) berechnet sich aus den verbleibenden Differenzen zum gesamten Inlandsverbrauch bzw. zum gesamten Inlandsabsatz des Straßenverkehrs nach Energiebilanz.
- Die Beimischung von Biokraftstoffen wird in allen Sektoren gleich angenommen. Der Verbrauch an reinen Biokraftstoffen wird mangels genauer Informationen dem Straßenverkehr zugeordnet.

Mit diesen Annahmen ergeben sich die in Tabelle 13 dargestellten Anpassungsfaktoren, mit denen der mit TREMOD berechnete Verbrauch und die zugehörigen Emissionen im Inland in die kraftstoffabsatzbezogenen Ergebnisse nach Energiebilanz umgerechnet werden.

<b>Jahr</b>	<b>Straße, Kfz&lt;=3,5t Otto+Diesel</b>	<b>Straße, Kfz&gt;3,5t Diesel</b>
2000	0,96	1,33
2005	0,92	1,07
2010	0,90	1,09
2011	0,91	1,05
2012	0,89	1,13
2013	0,91	1,15

Der Unterschied zwischen Inlandsverbrauch und Kraftstoffabsatz im Zeitverlauf ist z.T. starken Schwankungen unterworfen. Diese lassen sich bisher nur teilweise erklären. Auf der anderen Seite ist der mit TREMOD berechnete Inlandsverbrauch auch mit Unsicherheiten verbunden, da die zugrunde liegenden Kennzahlen (Fahrleistungen, Flottenzusammensetzung, spezifischer Energieverbrauch) keine exakten Größen sind, sondern ihrerseits zum Teil auf vereinfachten Hochrechnungen und Modellierungen beruhen.

Folgende Zusammenhänge können beobachtet werden:

- Beim Otto-Kraftstoff besteht die beste Korrelation zwischen Inlandsverbrauch und Absatz. Ab dem Jahr 2000 liegt der Inlandsverbrauch über dem Absatz. Grund dafür könnte die zunehmende Preisdifferenz zwischen Deutschland und den Nachbarländern sein (siehe z.B. DIW 2005).
- Beim Dieselmotorkraftstoff lag der Absatz bis zum Jahr 2004 über dem Inlandsverbrauch. Eine Ursache könnte sein, dass im Bereich Straßenverkehr Dieselmotorkraftstoff als Absatz erfasst ist, welcher außerhalb des Straßenverkehrs verbraucht wird. Dies legt eine Untersuchung des ifeu für das Umweltbundesamt nahe (IFEU 2009). Danach könnten z.B. im Jahr 2008 etwa 50 PJ (ca. 4% des gesamten Dieselmotorkraftstoffabsatzes) fälschlicherweise dem Straßenverkehr zugeordnet sein.
- Von 2000 bis 2003 stieg der Dieselmotorkraftstoffabsatz deutlich langsamer als der Inlandsverbrauch. Seit 2007 liegt der Inlandsverbrauch über dem Absatz. Hierbei dominiert vermutlich der Preiseffekt, der zu einer zunehmenden Betankung im Ausland geführt hat.

### 5.5.5. Emissionsfaktoren

Basis für die spezifischen Energieverbräuche und Emissionsfaktoren in TREMOD ist das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) (z.B. INFRAS 2004 bzw. INFRAS 2014). Entsprechend der Systematik in HBEFA werden in TREMOD die folgenden Arten an Emissionsfaktoren unterschieden:

- **Emissionsfaktoren im warmen Betriebszustand [in g/Fahrzeug-km] („warme Emissionsfaktoren“)**: Diese Faktoren für Motoren im warmen Betriebszustand hängen ab u.a. vom Fahrverhalten bzw. der „Verkehrssituation“.
- **Kaltstartzuschläge [in g/Startvorgang]**: Diese Emissionszuschläge nach dem Start der Motoren hängen von der Umgebungstemperatur beim Startvorgang, der Standzeit vor dem Start (als Näherung für die Motortemperatur beim Starten) und der Fahrtlänge anschließend an den Startvorgang ab. Diese Parameter werden in HBEFA im „Umgebungsmuster“ zusammengefasst.
- **Verdampfungsemissionen** (relevant für HC, NMHC, Benzol). HBEFA unterscheidet nach:
  - Verdampfung nach Motorabstellen (= Heiß- bzw. Warm-Abstellen) [in g/Abstellvorgang]
  - Verdampfung infolge Tankatmung (gelegentlich auch als „Verdunstungsemissionen“ bezeichnet) [in g/Tag und Fahrzeug]
  - Running Losses (in g/Fzkm): Emissionen während der Fahrt.

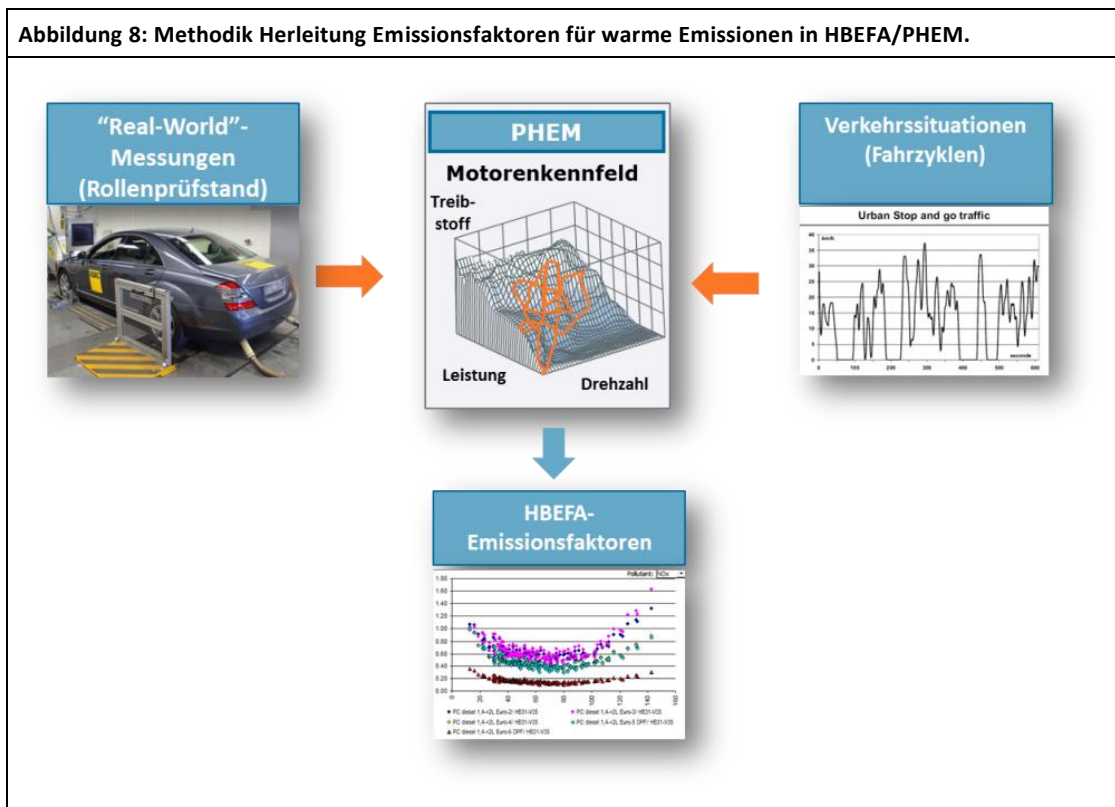
#### Warme Emissionsfaktoren

In HBEFA sind für alle Kombinationen von Komponenten (Luftschadstoffe, Treibhausgase, Kraftstoffverbrauch), Fahrzeugschichten, Verkehrssituationen und Steigungsklassen die entsprechenden Emissionsfaktoren abgelegt. Für die Fahrzeugkategorie der leichten Nutzfahrzeuge ergeben sich so für ein Referenzjahr pro Komponente rund 180.000 Datensätze (Emissionsfaktoren).

Abbildung 8 fasst das methodische Vorgehen für die Herleitung der Emissionsfaktoren schematisch zusammen. Kernelement ist dabei das „Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model“ (PHEM), das von der Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik FVT<sup>10</sup> in Graz, Österreich, entwickelt wurde (siehe Hausberger et al. 2009, Rexeis et al. 2013). PHEM wurde u.a. entwickelt, da die große Anzahl an Emissionsfaktoren, die in HBEFA benötigt werden, nur mit sehr großem Aufwand mit Prüfstandsmessungen belegt werden können. Daher ist PHEM darauf ausgelegt, auf der Basis von Fahrzyklen (in der Form von Geschwindigkeits-Zeit-Daten in 1 Hz-Auflösung), welche den verschiedenen Verkehrssitua-

<sup>10</sup> FVT ist ein spin-off-Unternehmen des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik IVT an der Technischen Universität Graz (TU Graz) in Österreich.

tionen entsprechen, Emissionsfaktoren für die im HBEFA definierten Fahrzeugschichten zu simulieren. Für die Kalibrierung der in PHEM hinterlegten Motorenkennfelder (funktionale Beziehung zwischen Leistung, Drehzahl und Verbrauch bzw. Emissionen eines Motors) werden Rollenprüfstandsmessungen (bzw. Motorenprüfstandsmessungen für schwere Nutzfahrzeuge) verwendet, wobei auch diese Messdaten sekundlich aufgelöst sein müssen. Durchführung und Auswertung von Prüfstandsmessungen sind verhältnismäßig aufwändig, weshalb zurzeit untersucht wird, inwiefern on-board-Messungen (z.B. mit PEMS<sup>11</sup>) für die Validierung und Kalibrierung von PHEM eingesetzt werden können.



[Quelle: INFRAS]

Die Basis-Emissionsfaktoren aus PHEM werden ins HBEFA integriert.

Verschiedene Einflussgrößen bestimmen das Niveau der Emissionsfaktoren im HBEFA maßgeblich. Die wichtigsten Parameter, welche hierbei berücksichtigt werden, umfassen:

- Längsneigung
- Abgasstandard
- Größenklasse

<sup>11</sup> Portable Emission Measurement System

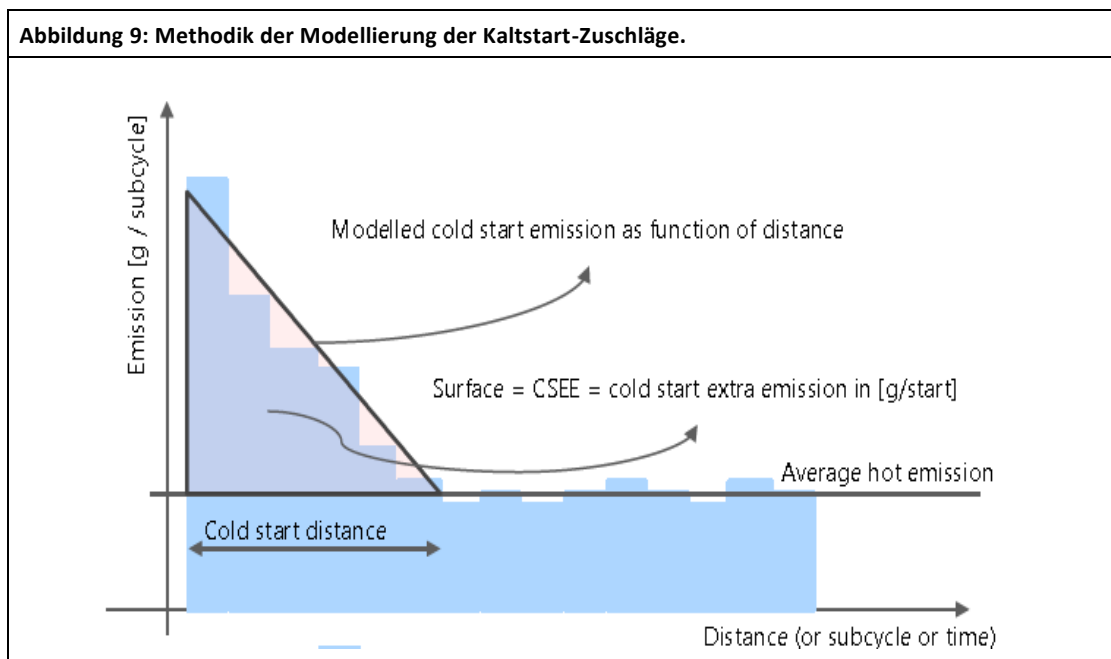


- Ausstattung mit Partikelfiltern sowie Klimaanlage
- Verschlechterung des Emissionsverhaltens mit steigendem Fahrzeualter bzw. der Gesamtfahrleistung des Fahrzeugs

### Kaltstart-Zuschläge

Die sogenannten Kaltstart-Zuschläge bilden den Einfluss der Motorentemperatur nach dem Starten des Motors gegenüber dem Zustand im Fahrbetrieb ab. In der Regel sind die Emissionen nach dem Start des Motors gegenüber dem normalen Fahrbetrieb höher. Hohe Anteile der Kaltstartemissionen an den Gesamtemissionen (warme, Kaltstart- und Verdunstungsemissionen) treten vor allem bei den HC-Emissionen auf, bei den Komponenten  $\text{CO}_2$  und  $\text{NO}_x$  ist der sog. „Kaltstartanteil“ hingegen meist gering bis vernachlässigbar.

Im HBEFA bzw. in TREMOD werden die Kaltstart-Emissionen mit einem Ansatz der EMPA (Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt) modelliert, dessen Schema in Abbildung 9 illustriert wird. Die Kaltstartzuschläge werden dabei in Gramm pro Startvorgang angegeben. Der Zuschlag ist abhängig von der Umgebungstemperatur (T), der zurückgelegten Fahrstrecke nach dem Startvorgang (d) und der Standzeit des Fahrzeugs vor dem Start (t). Der Zuschlag nimmt kontinuierlich ab, während sich die Temperatur im Motor auf die Temperatur der „warmen“ Emissionsphase erhöht.



[Quelle: INFRAS/EMPA (unveröffentlicht)]

Die notwendigen Eingangsparameter für die Modellierung der Kaltstart-Emissionen umfassen damit verschiedene Kenngrößen, welche im HBEFA als sogenannte Umgebungsbedingungen („ambient conditions“) bezeichnet werden:

- Tageszeitlicher Temperaturverlauf.
- Tageszeitliche Fahrlängenverteilung zur Ermittlung der mittleren Standzeiten der Fahrzeuge (in 1-km-Schritten, d.h. 0-1 km, 1-2 km, ..., >20 km).
- Tageszeitliche Verteilung der Abstellzeiten (in 30-Min. Schritten, d.h. 0-30 Min, 30-60 Min, ..., >12 Stunden).
- Tageszeitliche Verteilung des Verkehrs.

Die genannten Eingangsdaten können im HBEFA nach Ländern variiert werden. Für TREMOD werden entsprechend Daten für Deutschland verwendet.

### **Verdunstungsemissionen**

Die Verdunstungsemissionen im HBEFA werden mit dem für das Emissionsmodell COPERT entwickelten Ansatz modelliert. Details zur Methodik sind in Mellios et al. (2012) zu finden. Die Verdunstungs-Emissionsfaktoren im HBEFA werden in Gramm/Fahrzeug bzw. in Gramm/Fahrzeugkilometer (für die „running losses“) angegeben und werden im HBEFA ausschließlich für die HC-Emissionen bei Benzinfahrzeugen angegeben.

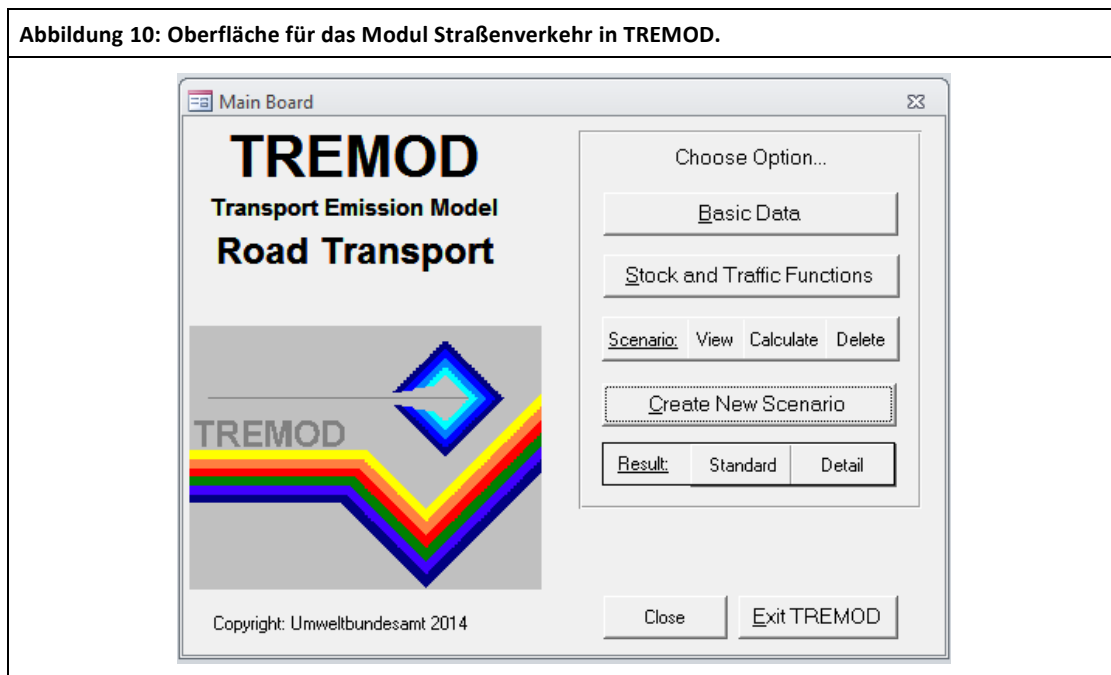
Für die Berechnung der Verdunstungsemissionen sind – wie für die Kaltstartzuschläge – Angaben zu den Umgebungsbedingungen notwendig. Außerdem sind Angaben zur Volatilität der Kraftstoffe zu hinterlegen. Diese wird über den Kennwert RVP „Reid vapour pressure“ (in kPa) charakterisiert. Die Werte werden als Jahresmittel angegeben (ggf. differenziert nach verschiedenen Jahreszeiten).

### **Vorkettenemissionen**

Zusätzlich zu den direkten Emissionen werden in TREMOD auch Emissionen bei der Kraftstoff- bzw. Strombereitstellung (also well-to-tank) bilanziert. Diese sind proportional zum Endenergieverbrauch eines Fahrzeuges (g Schadstoff pro MJ oder kWh). Die Emissionen der Bereitstellung sind insbesondere für die Bilanzierung der Treibhausgase und für den Vergleich verschiedener Antriebe, z.B. Benzin vs. Strom, relevant. In der Berichtserstattung des Umweltbundesamts im Rahmen des ZSE werden diese Emissionen nicht bilanziert, da sie anderen Sektoren, z.B. dem Energiesektor, zugerechnet werden bzw. nicht mehr in den nationalen Bezugsraum fallen.

### 5.5.6. Emissionsberechnung

Die Emissionsberechnung erfolgt wie in Abbildung 4 dargestellt durch die Verknüpfung der Bestandsdaten bzw. Flottenzusammensetzung, Fahrleistung und Emissionsfaktoren. Nutzer, welche ein eigenes Szenario erstellen wollen, können dazu die „Create New Scenario“-Oberfläche aufrufen (siehe Abbildung 10).



[Quelle: IFEU]

Hierbei müssen Schritt für Schritt folgende Parameter definiert werden, wobei dem Nutzer offen steht, ob Werte eines bestehenden Szenarios beibehalten oder geändert werden:

- 1. Definition eines Szenarios und enthaltener Bezugsjahre**
- 2. Berechnung des Bestands und der Flottenzusammensetzung**
  - a. Jährliche Neuzulassungen/Überlebenskurven pro Fahrzeugsegment
  - b. Bestände pro Fahrzeugsegment bis zum letzten Realjahr
  - c. Anteile Emissionsstufen pro Fahrzeugsegment und Zulassungsjahr
  - d. Anteil Abgasminderungstechnologien, Klimaanlage pro Fahrzeugsegment und Zulassungsjahr
  - e. Zwischenschritt: Prüfung der Eingaben (Summen) und Übersicht Zwischenergebnis
- 3. Berechnung der Fahrleistungen (und Verkehrsleistungen)**

- a. Gesamtfahrleistung pro Fahrzeugkategorie und deren Aufteilung pro Straßentyp
- b. Fahrleistungsrelation und Auslastungsgrad pro Segment und Straßenkategorie, Fahrzeugalter
- c. Anteil der Energieart bei Antrieben mit mehr als einer Energieart
- d. Auswahl Umgebungsmuster für Kaltstart- und Verdunstungsemissionen (Temperatur, Abstellzeit, Fahrtlänge, etc.)
- e. Zwischenschritt: Prüfung der Eingaben (Summen) und Übersicht Zwischenergebnis

#### **4. Berechnung der Emissionsfaktoren**

- a. Warme Emissionsfaktoren pro Straßenkategorie für neue Fahrzeugschichten (optional Korrekturfaktoren gegenüber HBEFA)
- b. Kalte Emissionsfaktoren pro Straßenkategorie für neue Fahrzeugschichten (optional Korrekturfaktoren gegenüber HBEFA)
- c. Kraftstoffeffizienz pro Fahrzeugschicht, Straßenkategorie und Erstzulassungsjahr (optional Korrekturfaktoren gegenüber TREND-Szenario)
- d. Anteil Kraftstoffbeimischungen (Biokraftstoffe)
- e. Zwischenschritt: Prüfung der Eingaben (Summen) und Übersicht Zwischenergebnis

#### **5. Berechnung der Ergebnisse**

Der so definierte Datensatz wird unter einem Szenario-Namen gespeichert. Anschließend kann das Szenario ausgewählt und berechnet werden. Nach Ende der Berechnung können die Ergebnisse abgerufen werden. Die Ergebnisse der sogenannten Systemszenarien, das sind die Zeitreihen für die Realjahre 1950-2013 und das mit dem Umweltbundesamt abgestimmte Trendszenario bis 2030, sind bereits seitens IFEU berechnet und können in der benötigten Form abgerufen werden (s. nächster Abschnitt).

### **5.5.7. Modellresultate/Outputs**

Die TREMOD-Ergebnisse können nach verschiedenen Merkmalen aggregiert/differenziert abgefragt werden.

Abbildung 11: Standard-Ergebnisformular für den Straßenverkehr in TREMOD (Version 5.53).

[Quelle: IFEU]

Im **Standard-Ergebnisformular** (siehe Abbildung 11) sind folgende Merkmale verfügbar:

- Spezifische Werte: Standardmäßig werden die Gesamtemissionen in Deutschland ausgegeben, durch die Auswahl „specific values“ können auch die spezifischen Emissionen pro km bzw. pro P-km oder t-km berechnet werden.
- Szenario und Zeitraum: West/Ost (1950-1993), Real (1950-2013), Basis (1950-2030)
- Fahrzeugkategorie: Alle Fahrzeugkategorien (KKR, KR, Pkw, LNG, Lkw, LZ, SZ, LBus, RBus, übrige Kfz, übrige Kfz) sowie verschiedene Gruppen, z.B. motorisierter Individualverkehr (MIV), Personenverkehr, Güterverkehr, etc.
- Fahrzeugschicht: Antriebsart, Emissionsstandard, Abgasminderungstechnologie (DPF, EGR, SCR), Lkw-Mautklassen, ZSE-Klassen
- Emissionsart: Warm, Kalt, Start, Stopp&Abstellen, Tankatmung, Verdampfung, Running losses
- Straßenkategorie: Straßenkategorien, Straßentypen
- Größenklassen
- Kraftstoff-/ Energieart
- Komponenten: Schadstoffkomponenten, Energieverbrauch in Masse (Tonnen) oder MJ
- Ergebnisparameter: direkte/ indirekte Emissionen, Vorkettenemissionen (Auswahl Variante, z.B. Strommix, möglich), Fahrleistung, Verkehrsleistung, Bestand

- Ergebnisart: Inlandsprinzip, Energiebilanzprinzip

Im **Detail-Ergebnisformular** können als weitere Merkmale das Erstzulassungsjahr der Fahrzeuge und der Straßengradient unterschieden werden.

In der **ZSE-Ergebnisoberfläche** werden die Ergebnisse und die zugrundeliegenden Annahmen in der für die nationale Emissionsberichtserstattung des Umweltbundesamts erforderlichen Form ausgegeben.

## 5.6. Eingangsdaten und Quellen

Im Folgenden werden die wichtigsten Datengrundlagen für TREMOD skizziert, welche für die im vorigen Kapitel beschriebene Methodik erforderlich sind. Eine detaillierte Übersicht aller Daten ist in den separaten TREMOD-Berichten zu finden (IFEU 2012, IFEU 2014).

### 5.6.1. Flottenzusammensetzung

Wesentliche Datengrundlage für die Flottenzusammensetzung in TREMOD sind Daten des Zentralen Fahrzeugregisters (ZFZR) des Kraftfahrtbundesamtes, welches alle Fahrzeuge in Deutschland mit einem Kennzeichen erfasst. Der Fahrzeugbestand für die Jahre 1950-2000 wurde aufgrund der schriftlichen Statistiken des KBA, von „Verkehr in Zahlen“ (ViZ), den Statistischen Jahrbüchern der DDR sowie internen Statistiken der DDR für TREMOD aufbereitet. Ab dem Bezugsjahr 2001 wird die KBA-Datenbank speziell für die Zwecke der TREMOD-Aktualisierung vom KBA im Auftrag der BAST ausgewertet, welche eine Differenzierung nach Fahrzeugschichten und Erstzulassungsjahr ermöglicht. Das Vorgehen zur Integration der Daten in TREMOD wurde in Kapitel 5.5.2 erläutert. Die Bestände der Kleinkrafträder (KKR) werden nicht in der KBA Statistik erfasst, sondern aus Verkehr in Zahlen (ViZ) übernommen (z.B. BMVI 2014a).

Für die Flottenentwicklung in Szenarien wird der Fahrzeugbestand über die jährlichen Neuzulassungen und spezifische Überlebensfunktionen pro Fahrzeugsegment berechnet. Die Überlebensfunktionen wurden hierbei aus den historischen Beständen abgeleitet. Die Neuzulassungen pro Fahrzeugschicht können je nach Szenario variiert werden. Im TREMOD-Trend-Szenario leiten sich diese z.T. aus historischen Trendentwicklungen und z.T. aus Zielvorgaben, welche mit dem UBA abgestimmt sind, z.B. Bestand von Elektro-Pkw in 2020 und 2030, ab. Die Anteile der Emissionsstufen orientieren sich an der aktuellen Emissionsgesetzgebung.

### 5.6.2. Fahrleistungen

Für die Ableitung der Fahrleistungen nach den für TREMOD erforderlichen Kriterien müssen verschiedene Informationsquellen herangezogen werden. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick:

- Im Auftrag der BASt wurden kontinuierlich Zählungen von automatischen Dauerzählstellen an Bundesfernstraßen durchgeführt und jährlich veröffentlicht, z.B. in BAG (2013). Hierbei können jedoch nur die Kategorien „Leichtverkehr“ und „Schwerverkehr“ differenziert werden.
- In der Regel findet außerdem alle fünf Jahre eine Straßenverkehrszählung (SVZ) statt, bei der die Fahrleistungen nach sechs Fahrzeugkategorien differenziert und für Bundesautobahnen sowie für die freien Strecken der Bundes- und Landesstraßen ermittelt werden (Vergleiche BASt 2013, 2007; Lensing 1997, 2003). Diese Erhebungen bilden somit nicht die Gesamtfahrleistung auf allen Straßen ab.
- Fahrleistungserhebungen wurden in den Jahren 1990, 1993 und 2002 durchgeführt (IVT 1993, 1994, 2004). Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um Auswertungen von Befragungen zu Inländerfahrleistungen. Auf die Inlandsfahrleistung wird aus den Inländerfahrleistungen und Erhebungen zum grenzüberschreitenden Verkehr geschlossen. Eine aktuelle Erhebung wird demnächst für das Jahr 2014 vorliegen.
- Für die Bezugsjahre 1986, 1990 und 1993 wurden in den Fahrleistungsuntersuchungen die Fahrleistungen nach differenzierten Merkmalen bzgl. Straßen- als auch Fahrzeugkategorien in Deutschland ermittelt (Heusch-Boesefeldt 1994a, 1994b, 1996).
- Traditionell eine wichtige Quelle zu den Inländerfahrleistungen in Deutschland für verschiedene Fahrzeugkategorien ist die Fahrleistungs- und Verbrauchsrechnung des DIW (DIW 2005; ViZ BMVBS, n.d.).
- Für das aktuellste Bezugsjahr werden z.T. weitere Quellen verwendet, da die zuvor genannten Quellen z.T. später veröffentlicht werden:
  - Die Intraplan-Mittelfristprognose Winter bzw. Sommer (z.B. Intraplan 2012) für die Fahrleistungsentwicklung der Pkw
  - Die Marktbeobachtungen Güterverkehr für schwere Nutzfahrzeuge (z.B. BAG 2014)
  - Sofern keine Fahrleistungsdaten vorliegen, die Bestandsentwicklung nach KBA

### **Gesamtfahrleistung nach Straßenkategorien**

Zur Ableitung der Gesamtfahrleistungen werden sowohl die Inlands- als auch die Inländerfahrleistung der Fahrleistungserhebung 2002 bzw. Daten der Straßenverkehrszählungen und der automatischen Dauerzählstellen aus den Jahren 1995 bis 2002 sowie die Fahrleistungsuntersuchung aus dem Jahre 1993 verwendet. Die Fahrleistungen in der Zeitreihe 1993-2002 werden ausgehend von den Eckwerten 1993 und 2002 aufgrund der Bestandsentwicklung, der Straßenverkehrszählungen und im Abgleich mit der Energiebilanz plausibel abgeleitet. Für die Jahre 2003 bis 2013 wurden je nach Fahrzeugkategorie weitere Quellen sowie eigene Abschätzungen mit einbezogen. Die Fahrleistungen der Pkw werden anhand der Abschätzungen von DIW

(siehe z.B. in BMVI 2014b) und Prognosen von Intraplan, z.B. der Winterprognose 2011/12 (Intraplan 2012), fortgeschrieben. Für die übrigen Fahrzeugkategorien wurden u.a. die Straßenverkehrszählungen und speziell für SNF die BAG-Mautstatistik (z.B. BAG 2012) verwendet. Bei fehlenden Informationen zur Fahrleistung (z.B. für MZR und LNF) wurde die Entwicklung der Fahrleistung in Anlehnung an die Entwicklung der Fahrzeugbestände fortgeschrieben.

Mit der noch unveröffentlichten Fahrleistungserhebung 2014 steht bald eine aktuelle Untersuchung zur Verfügung, die zeitnah eingearbeitet werden soll um die bisherigen Annahmen zu überprüfen und zu aktualisieren.

### **Fahrleistung nach Verkehrssituationen**

Für die Aufteilung der Fahrleistungen pro Straßenkategorie nach Verkehrssituationen existiert bisher nur die Abschätzung der Fahrleistungsuntersuchung 1993 (Heusch-Boesefeldt 1996). Die Aufteilung der Fahrleistung nach Verkehrssituation erfolgt entsprechend den Annahmen in HBEFA.

### **Fahrleistung nach Fahrzeugmerkmalen**

Die Fahrleistung pro Fahrzeugschicht in TREMOD wird anhand verschiedener Untersuchungen abgeleitet. In der Fahrleistungsuntersuchung (FLU) 1993 (Heusch-Boesefeldt 1996) wurde die Fahrleistung nach Antriebsart, Größenklasse und für die Straßenkategorien differenziert. Die Fahrleistungsrelationen nach Alter wurden aus der Fahrleistungserhebung 1993 (IVT 1994) verwendet.

Für das Jahr 2002 lagen mit der Fahrleistungserhebung die Inländerfahrleistungen nach Größenklasse und Alter für die meisten Fahrzeugkategorien vor (IVT 2004). Die Differenzierung der Fahrleistungen nach den Merkmalen Antriebsart und Größenklasse für einzelne Straßenkategorien, wie sie mit der Fahrleistungsuntersuchung 1993 vorhanden war, fehlt für das Jahr 2002. Aus diesem Grund wurde folgendes Vorgehen gewählt:

- Die Fahrleistungsrelationen nach Antriebsart, Größenklasse und Alter wurden soweit möglich anhand der Fahrleistungserhebung 2002 neu abgeleitet.
- Die ursprünglichen Unterschiede in den Fahrleistungsrelationen auf verschiedenen Straßenkategorien wurden, soweit sinnvoll und möglich, anhand der Fahrleistungsuntersuchung 1993 differenziert.

Die größte Differenzierung liegt bei den Pkw vor, bei anderen Fahrzeugkategorien lassen sich hingegen aufgrund unzureichender Stichproben in den Untersuchungen nicht alle Merkmale differenzieren. Z.B. wird bei den LNF dieselbe Fahrleistungsrelation nach Alter wie für alle Lkw angenommen, auch bleibt eine straßenspezifische Unterscheidung aus.



### **Verkehrsleistung und Fahrleistung in Szenarien**

Die Verkehrsleistungen des TREND-Szenarios werden der Verkehrsprognose oder „Verflechtungsprognose“ der Bundesverkehrswegeplanung 2030 (VP30) entnommen (Intraplan 2014). Diese gibt die Gesamtverkehrsleistung des Straßenpersonen- und des Straßengüterverkehrs vor. Über die mittlere Kapazität und Auslastung wird mithilfe der Verkehrsleistung die Fahrleistung berechnet. Hierfür liegen verschiedene Datenquellen, z.B. die FLU 1993 (Heusch-Boesefeldt 1996), die BAG Mautstatistik (BAG 2013), sowie eigene Annahmen zugrunde.

### **5.6.3. Spezifischer Energieverbrauch**

Die verwendeten Datengrundlagen zur Ermittlung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs werden in Kapitel 5.5.4 beschrieben und hier nur kurz aufgeführt:

- HBEFA 3.2 für den Realverbrauch pro Fahrzeugschicht und Verkehrssituation;
- Die KBA-Monitoring-Werte zur Basiskorrektur der deutschen Pkw- und LNF-Flotte und deren Entwicklung im Zeitverlauf;
- Untersuchungen von Mock et al. (2013) sowie eigene Annahmen zur Abschätzung der Differenz zwischen Realverbrauch und NEFZ für Pkw.

### **5.6.4. Gesamter Energieverbrauch, Kraftstoffbilanz**

Für den Abgleich der Bottom-Up berechneten Energieverbräuche nach dem Inlandsprinzip mit den Tankmengen nach Energiebilanz werden verschiedene Daten verwendet, welche in Tabelle 14 aufgeführt sind.

Tabelle 14: Übersicht der Quellen zu den Energiebilanzen für Deutschland			
Quelle	Bezeichnung	Differenzierung der Energiedaten	Verfügbarkeit
AG Energiebilanzen	Bilanzen (1990 bis 201x)	Verkehrsträger: alle Kraftstoffarten: fossil	AGEB Website <a href="http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=6">http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=6</a>
	Vorläufige Bilanzen/ Schätzbilanzen	Verkehrsträger: alle Kraftstoffarten: fossil	intern über UBA
	Satellitenbilanzen	Kraftstoffarten; fossile und Biokraftstoffe	AGEB Website <a href="http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=6">http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=6</a>
BAFA	Amtliche Mineralöl-daten (Tabelle 7J und Tabelle 9)	Verkehrsträger: nur Luft- und Binnenschifffahrt separat Kraftstoffarten: fossil und Biokraftstoffe	BAFA Website <a href="http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel_rohoel/amtliche_mineraloeldaten/index.html">http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel_rohoel/amtliche_mineraloeldaten/index.html</a>
MWV	Jahresberichte	Verkehrsträger: alle Kraftstoffarten: fossil (inkl. Beimischungen)	MWV Website <a href="http://www.mwv.de/index.php/service/publikationen">http://www.mwv.de/index.php/service/publikationen</a>

### 5.6.5. Emissionsfaktoren

Die in HBEFA enthaltenen Emissionskennwerte beruhen auf einer breiten Datenbasis europäischer Messinstitute und auf europäischer Ebene abgestimmten und entwickelten Methoden zur Emissionsmodellierung. Die Koordination der europäischen Aktivitäten finden im Rahmen der ERMES-Gruppe statt (<http://www.ermes-group.eu>). Alle relevanten europäischen Emissionsberechnungsmodelle für den Straßenverkehr (v.a. HBEFA und COPERT, sowie neben TREMOD weitere nationale Modelle) basieren auf den Erkenntnissen dieses Prozesses.

Eine wichtige Aufgabe der Emissionsmodellierung ist die Ableitung realistischer Verbrauchs- und Emissionsfaktoren. Hierzu wird das Modell PHEM der TU Graz eingesetzt (TU Graz 2009), mit dem die Emissionsfaktoren für die in HBEFA und damit in TREMOD definierten Verkehrssituationen berechnet werden.

Die Emissionsfaktoren für Szenarien basieren, soweit nicht durch Messungen abgebildet, auf Abschätzungen auf Basis der Emissionsgesetzgebung bzw. Technologieentwicklungen, welche in HBEFA hinterlegt sind. TREMOD-Nutzer können jedoch auch eigene Emissionsfaktoren mittels Korrekturfaktoren definieren.

## 5.7. Operationelle Aspekte

TREMOD basiert auf der **Plattform Microsoft ACCESS**, Version 2002-2010. Die verwendeten Programmiersprachen sind SQL und Visual Basic.

Die **Inputdaten** für TREMOD werden in verschiedenen vorgelagerten Modellen aus den jeweiligen Originalquellen so aufbereitet, dass sie in TREMOD übernommen werden können:

- Fahrzeugbestände KBA: Die Fahrzeugbestände und Neuzulassungen, welche im Rahmen einer Sonderauswertung des KBA bezogen werden, werden in einer eigenen ACCESS-Datenbank aufbereitet.
- Fahrleistungsdaten: Straßenverkehrszählungen u.a. FL-Daten werden in einem eigenen Excel-Modell aufbereitet, das die vorhandenen Daten aus den verschiedenen Quellen mit verschiedenen zusätzlichen Annahmen zu einer konsistenten Zeitreihe der Fahrleistungen nach Fahrzeug- und Straßenkategorien zusammenführt.
- Verkehrs- und Betriebsdaten Bahn: eigenes Excel-Modell.
- Binnenschiffs-, Flugverkehr, Mobile Maschinen: eigene ACCESS-Modelle TREMOD\_NA, TREMOD\_AV, TREMOD\_MM.
- Inputdaten für Szenarien je Verkehrsträger: eigene Excel-Modelle.
- Korrektur des Energieverbrauchs nach Energiebilanz und Beimischung von Biokraftstoffen: eigenes Excel-Modell.

Neben den in Kapitel 5.5.7 genannten Ergebnisschnittstellen (Standard-/Detailergebnis, ZSE-Ergebnis) gibt es weitere Output-Schnittstellen, welche jährlich aktualisiert werden:

- Aufbereitung Bestände, Fahrleistungen, Emissionen nach Wirtschaftszweigen: Modul in TREMOD erzeugt Outputtabellen für das Statistische Bundesamt
- Detailergebnisse für die Verkehrsträger Luft, Schiene, Binnenschiffahrt, Mobile Maschinen
- Spezifische Umweltkennzahlen für alle Verkehrsträger für Verbändedatenbank der Allianz Pro Schiene

Weitere Output-Schnittstellen werden bei Bedarf aktualisiert:

- Bestands- und Flottendaten, Fahrleistungen sowie weitere relevante Merkmale für das HBEFA für die Berechnung der länderspezifischen Emissionsfaktoren
- Spezifische Emissionsfaktoren für die LCA-Datenbank Probas des Umweltbundesamtes
- Bestands- und Flottendaten sowie Emissionskennzahlen für das BMUB-Tool Renewbility

## 5.8. Zugang, Publikation und Dokumentation

Einen direkten Zugang zu TREMOD haben nur die als Nutzer genannten Bundesministerien und Behörden (UBA, BAST, BMUB, BMVI) und Lizenznehmer (VDA, Automobilfirmen, DB AG). Die Übermittlung des TREMOD-Programms erfolgt je nach Nutzer über einen internen Online-Server oder per Datenträger (CD).

Die Daten und Ergebnisse von TREMOD stehen neben ifeu den genannten Nutzern zur Verfügung. Weitere Interessenten, z.B. andere Behörden oder wissenschaftliche Institutionen, genauso wie Verbände und interessierte Einzelpersonen, können ausgewählte Daten auch über Anfrage an das Umweltbundesamt erhalten.

Da die Entwicklung und Nutzung von TREMOD über individuelle Vertragsvergaben erfolgt, gibt es keine Preisstrategie bzw. keine Lizenzkosten.

Die Dokumentation zu TREMOD umfasst verschiedene Dokumente:

- Technische Programmbeschreibung (intern verfügbar);
- Offizieller TREMOD-Bericht für das Umweltbundesamt mit Beschreibung der Grundlagen zu Daten und Methodik sowie Darstellung ausgewählter Ergebnisse (i.d.R. jährliche Veröffentlichung, zuletzt in IFEU 2012);
- Separater Anhang mit detaillierter Beschreibung der Dateninputs und –outputs (auf Anfrage beziehbar, letzte Version in IFEU 2012).

## 5.9. Weitere Aspekte

Die Modellierung der Energieverbräuche und Emissionen der anderen Verkehrsträger (Bahn, Luft, Binnenschiff, mobile Maschinen), welche hier nicht im Detail beschrieben wurde, stellt ebenfalls einen wichtigen Aspekt von TREMOD dar. Die Daten werden z.B. zum Vergleich von Verkehrsträgern hinsichtlich der spezifischen Umweltwirkungen, z.B. g Schadstoff pro Personen- oder Tonnen-Kilometer, und der nationalen Emissionsmengen genutzt. Zusätzlich sind die Energieverbräuche dieser Sektoren wichtig, um eine Konsistenz zu den Energieabsatzstatistiken der nationalen Energiebilanz herzustellen.

TREMOD-Daten werden zusätzlich für erweiterte Fragestellungen neben der Emissionsberechnung verwendet, darunter

- Modellierung von Fahrzeug- und Infrastrukturkosten für verschiedene Verkehr-/ Technologieoptionen;
- Materialaufwendungen (Ressourcen) für die Fahrzeugbereitstellung.

Entsprechende Weiterentwicklungen für zukünftige TREMOD-Versionen sind derzeit im Gange.

## 6. Vergleich der verwendeten Inputdaten

### 6.1. Aktivitätsdaten (AD; Verkehrsmengengerüste)

Im Folgenden werden die Aktivitätsdaten (AD) verglichen, welche die Modelle COPERT und TREMOD jeweils bereits für Deutschland beinhalten. Hierunter fallen sämtliche Verkehrsmengengerüste, also die Bestände und Fahrleistungen, deren Aufteilung nach Fahrzeugmerkmalen und Fahrprofilen (hier Straßenkategorien und mittlere Geschwindigkeiten), sowie die Anzahl der Start- und Stoppvorgänge. Dabei ist zu beachten, dass die AD von TREMOD bis 2010 als Grundlage für die Erarbeitung der AD von COPERT zur Verfügung standen.

#### 6.1.1. Ex-Post (Zeitraum 2000-2013)

##### Jährliche Fahrleistungen

Die gesamten Fahrleistungen (aller Fahrzeuge) weichen zwischen TREMOD und COPERT je nach Bezugsjahr um 1-11% voneinander ab (Tabelle 17). Ganz am Anfang der Zeitreihe liegen sie in den COPERT-Aktivitätsdaten leicht höher (um rund 1%), nehmen aber bis 2013 gegenüber den TREMOD-Daten kontinuierlich ab. 2013 liegen die Gesamtfahrleistungen gemäß dem COPERT-Datensatz 11% oder 80'000 Mio. Fzkm unter denjenigen des TREMOD-Datensatzes. Gemäß den TREMOD-Daten ist der Trend der Gesamtfahrleistungen über den betrachteten Zeitraum leicht steigend, gemäß den COPERT-Daten leicht sinkend.

Die Begründung dieser Unterschiede liegt in den unterschiedlichen Methoden zur Ableitung der Gesamtfahrleistung der beiden Modelle. In TREMOD werden die Gesamtfahrleistungen anhand verschiedener Quellen (z.B. der Fahrleistungserhebung und Straßenverkehrszählung) übernommen und nicht aufgrund des modellierten Verbrauchsresultates verändert (dafür kann im Ergebnis nach „Inlandsprinzip“ und „Energiebilanzprinzip“ unterschieden werden); nur der spezifische Kraftstoffverbrauch der PKW wurde am DIW-Fahrleistungs- und Verbrauchsmodell geeicht (vgl. Kapitel 5.5.4). In COPERT hingegen werden die Fahrleistungen nach einer ersten Modellierung so angepasst, dass der modellierte Kraftstoffverbrauch mit dem Absatz gemäß Energiebilanz übereinstimmt (vgl. Kapitel 4.5.4, 7.1.2). Die dabei veränderten Parameter sind der Fahrleistungsanteil nach Straßenkategorie, die Durchschnittsgeschwindigkeiten, die Fahrleistungsanteile nach Antrieb sowie die absoluten Fahrleistungen (welche aus Bestand und spezifischer Fahrleistung hergeleitet werden). Offensichtlich wurden im Datensatz für Deutschland v.a. letztere modifiziert, da sich die anderen Parameter weniger stark von den TREMOD-Aktivitätsdaten unterscheiden (s. folgende Abschnitte).

**Tabelle 15: Übersicht der Anteile pro Fahrzeugkategorie am total, sowie der relativen Differenzen zwischen den Aktivitätsdaten von COPERT und TREMOD.**  
 $\emptyset$  = Durchschnittliche Abweichung 2000-2013; Min./Max. = minimale/maximale jährliche Abweichung. Die Farbschattierungen visualisieren das Ausmaß der Abweichung (rot = negativ, d.h. COPERT-Wert liegt tiefer; grün = positiv, d.h. COPERT-Wert liegt höher).

AD-Typ	Kategorie	Anteil an den AD 2000-2013		$\Delta$ COPERT-TREMOD [%]		
		COPERT	TREMOD	$\emptyset$	Min.	Max.
Fahrleistungen	Total aller FzKat	100.0%	100.0%	-6.0%	-11.0%	1.0%
	PKW	83.6%	81.5%	-9.0%	-13.0%	-3.0%
	LNF	5.6%	5.5%	-8.0%	-15.0%	5.0%
	SNF	8.0%	9.4%	9.0%	0.0%	28.0%
	Busse	0.6%	0.6%	-6.0%	-11.0%	-2.0%
	KR	2.3%	3.1%	26.0%	8.0%	60.0%
Bestand	Total aller FzKat	100.0%	100.0%	-1.0%	-5.0%	0.0%
	PKW	83.2%	83.8%	0.0%	-4.0%	0.0%
	LNF	4.1%	4.1%	-1.0%	-10.0%	1.0%
	SNF	1.9%	2.0%	1.0%	-1.0%	6.0%
	Busse	0.2%	0.2%	0.0%	0.0%	2.0%
	KR	10.7%	10.0%	-7.0%	-14.0%	0.0%
Starts/Stopps	Total aller FzKat	100.0%	100.0%	11.0%	7.0%	19.0%
	PKW	91.4%	90.5%	10.0%	6.0%	16.0%
	LNF	6.1%	6.1%	11.0%	3.0%	26.0%
	KR	2.5%	3.4%	51.0%	30.0%	92.0%

Werden die einzelnen Fahrzeugkategorien betrachtet, zeigt sich, dass die absolut gesehen größten Unterschiede bei den PKW liegen, welche den höchsten Anteil an den Gesamtfahrleistungen ausmachen und so weitgehend das Bild der Gesamtfahrleistungen prägen. Die Fahrleistungen von COPERT liegen hier durchgehend unter denen von TREMOD (Abbildung 12). Bei den LNF zeigt sich ein ähnliches Muster der Unterschiede, allerdings auf tieferem absolutem Niveau. Bei den schweren Nutzfahrzeugen und den Krafträdern hingegen liegen die Fahrleistungen gemäß COPERT anfangs der Zeitreihe deutlich (28% respektive 60%) über den entsprechenden TREMOD-Werten, und diese Unterschiede nehmen über die Zeitreihe hinweg auf 5% (SNF) respektive 11% (KR) ab.

Abbildung 12: Vergleich der Ex-Post-Fahrleistungen gemäß TREMOD- und COPERT-Aktivitätsdatensätzen.



Quelle: Eigene Darstellung, Daten: IFEU, EMISIA; AD = Aktivitätsdaten

Auf der Segment-Ebene (also bei Differenzierung nach Kraftstoff/Technologie und Größenklasse) unterscheidet TREMOD in den Aktivitätsdaten mehr und feinere Klassen als COPERT. So enthalten die COPERT-AD beispielsweise keine Elektroantriebe für PKW; bei Liefer- und Lastwa-

gen werden nur die Antriebe Diesel und Benzin unterscheiden, CNG und LPG werden vernachlässigt. Abgasnachbehandlung durch Partikelfilter wird ebenfalls nur im TREMOD-Mengengerüst unterschieden. Die Unterschiede in den Fahrleistungen der PKW lassen sich aber nicht durch in COPERT nicht berücksichtigte Segmente erklären – die Fahrleistungen der letzteren liegen in der Größenordnung von nur 100 Mio. Fzkm und können daher den Unterschied von 80'000 Mio. Fzkm bei den PKW-Fahrleistungen nicht erklären – dieser liegt, wie oben beschrieben, in den Annahmen zu den spezifischen Fahrleistungen und den Anpassungen im Zuge der Kalibration des Kraftstoffverbrauchs begründet.

Bei den TREMOD-Aktivitätsdaten der PKW fällt auf Segment-Ebene der Sprung in den Größenklassenanteilen zwischen den Jahren 2005 und 2006 auf (Abbildung 13). Ab 2006 unterscheiden die TREMOD-Aktivitätsdaten nicht mehr drei Hubraumklassen (<1.4 l, 1.4-2 l, >2 l), sondern die Größenklassen „klein“, „mittel“ und „groß“ basierend auf den Kaufsegmenten der KBA-Statistik (vgl. Kap. 5.5.4). Dies verursacht eine Verschiebung in Richtung größere Klassen, v.a. von der mittleren Hubraumklasse 1.4-2l zur Kaufsegmentklasse „groß“. Sowohl Benziner wie Dieselfahrzeuge sind davon betroffen. COPERT stellt erst ab der 2016 erscheinenden Version 5 auf Kaufsegmente um. Entsprechend ist in der Zeitreihe (noch) kein durch die Umstellung verursachter Sprung ersichtlich.

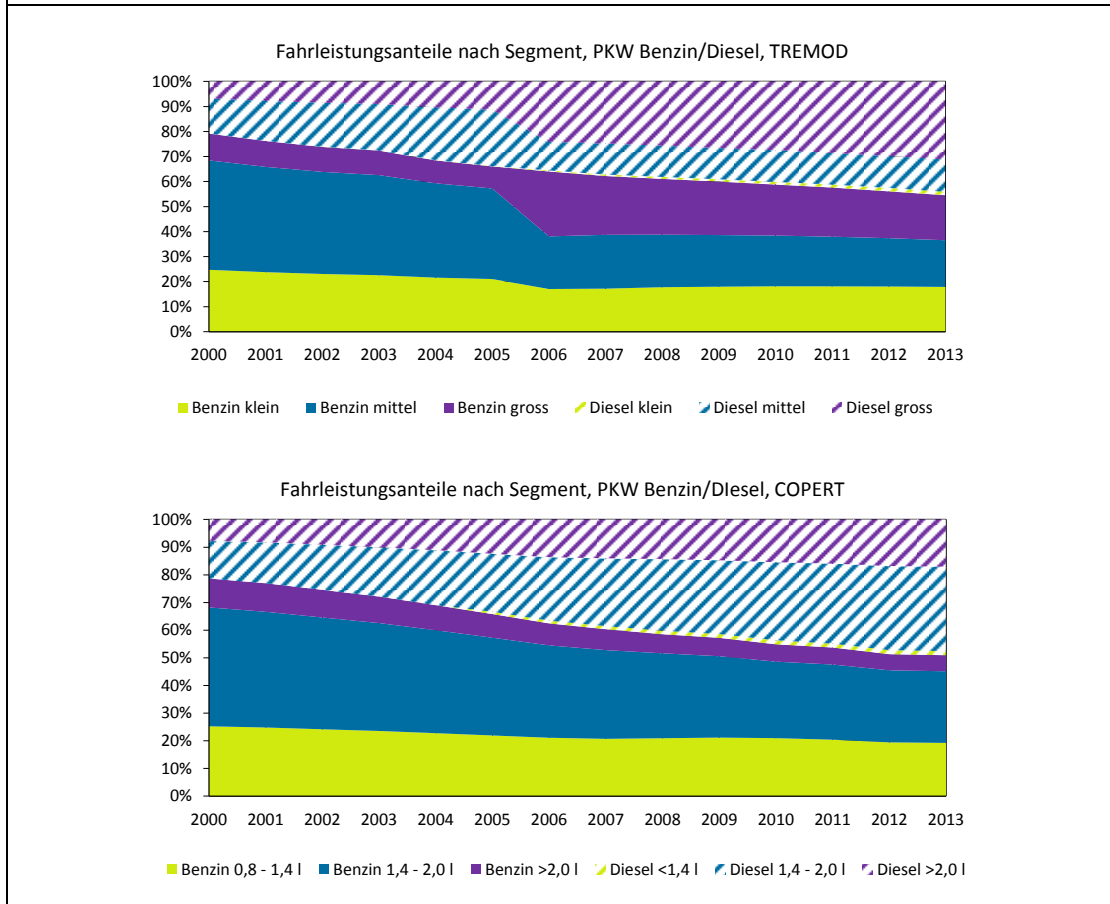
Etwas weniger auffällig, aber hinsichtlich Kraftstoffverbrauch und Emissionen relevanter ist, dass die TREMOD-Aktivitätsdaten gegen Ende der Zeitreihe einen niedrigeren von Dieselfahrzeugen verursachten Fahrleistungsanteil (44%) unterstellen als COPERT (48%).

Bei den LNF sind die Flottenzusammensetzungen in beiden Aktivitätsdatensätzen ähnlich – die Anteile Diesel bzw. Benzin unterscheiden sich um weniger als einen Prozentpunkt. Die elektrischen Fahrzeuge bei TREMOD machen 2013 nur 0.1% der Fahrleistungen aus.

Bei den SNF sind die Anteile der Solo-LKW in beiden Modellen ähnlich – in TREMOD ist ihr Anteil im Jahr 2000 noch leicht höher (37.5% vs. 35.6% in COPERT), bis im Jahr 2013 nähern sich aber die Anteile in beiden Modellen auf etwa 33.5% an. Bei den Sattel- und Lastzügen hingegen unterstellt COPERT einen höheren Anteil (rund 12%) leichterere Fahrzeuge unter 28t an den SNF, welchen TREMOD auf nur 4% - 5% beziffert; dafür beträgt bei TREMOD der Anteil 34-40t schwerer Fahrzeuge 53% (2000) bis 61% (2013), und dieser ist dafür bei COPERT niedriger (50-52%).



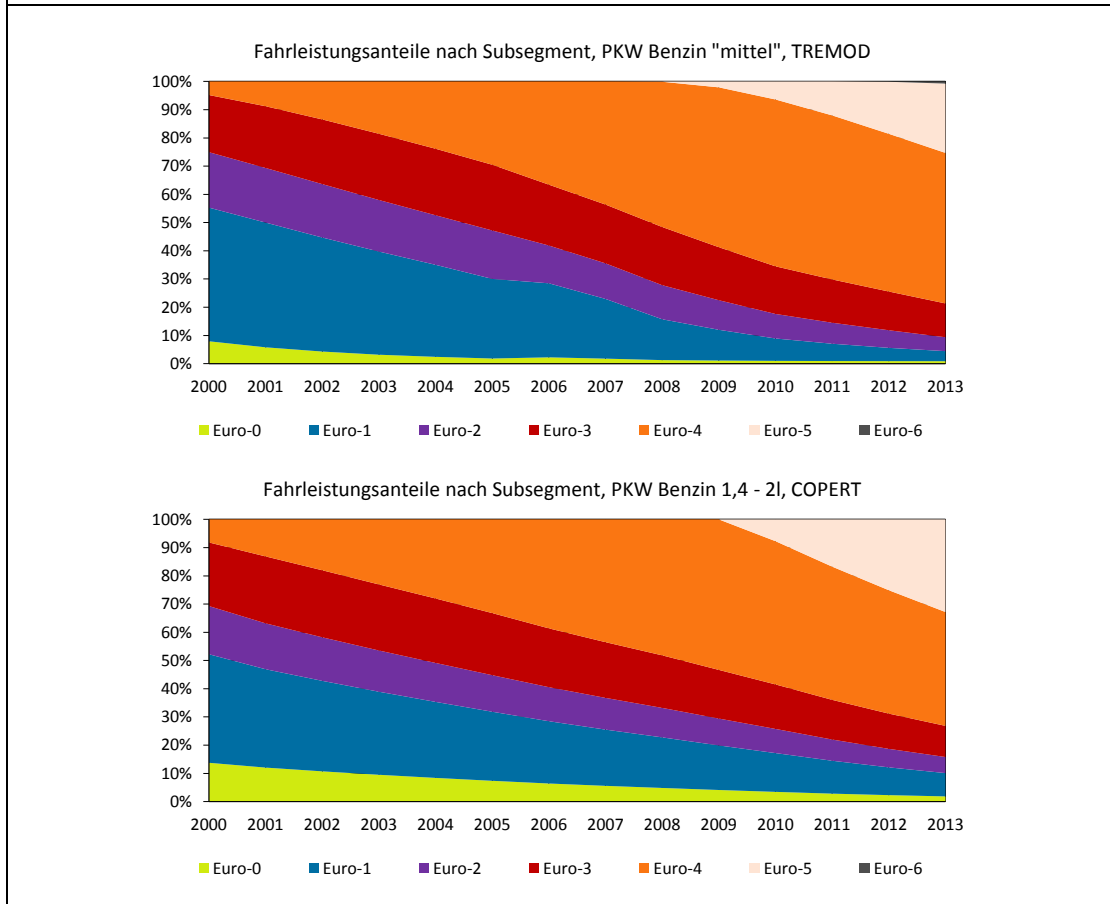
**Abbildung 13: Fahrleistungsanteile nach Segment (Kraftstoffart/Größenklasse) gemäß TREMOD- und COPERT-Aktivitätsdatensätzen.**



Quelle: Eigene Darstellung, Daten: IFEU, EMISIA

Bei der Unterscheidung nach Emissionsstandard sind die Unterschiede nicht auffällig (Abbildung 14). In TREMOD ergibt sich eine Verschiebung der Anteile nach 2005, da hier eine Umstellung der PKW-Größenklassen erfolgt (s.o.), und pro Größenklasse unterschiedliche Altersverteilungen auftreten; auf der anderen Seite erreichen gemäß den COPERT-Daten die Euro-5-Fahrzeuge schneller eine höhere Verbreitung – ihr Anteil nimmt bis 2013 auf 32% zu (gegenüber 25% gemäß dem TREMOD-Datensatz).

**Abbildung 14: Fahrleistungsanteile nach Emissionsstandard (Euro-Stufe) innerhalb der mittelgroßen Benzin-PKW gemäß TREMOD- und COPERT-Aktivitätsdatensätzen.**



Quelle: Eigene Darstellung, Daten: IFEU, EMISIA

Auch bei der räumlichen Verteilung der Fahrleistungen nach Straßentyp unterscheiden sich die Aktivitätsdatensätze nicht grundlegend. Beide unterstellen über die Zeitreihe relativ konstante Anteile außerorts, innerorts und auf Autobahnen. Bei TREMOD ist der Außerorts-Anteil um 2000 etwas höher (um 41% ggü. 38% gemäß COPERT) und nimmt bis 2013 auf 37% ab, während die Anteile innerorts und Autobahn um wenige Prozentpunkte auf 33% respektive 31% zunehmen. COPERT unterstellt noch weniger zeitliche Veränderung – hier nehmen aber die Außerorts- und Innerorts-Anteile über die gesamte Zeitreihe um je einen Prozentpunkt auf Kosten des Autobahn-Anteils zu.

Letztlich ist bei den Fahrleistungen nicht nur die Anzahl Fahrzeugkilometer relevant, sondern auch wie sie gefahren werden. Hier kommen die unterschiedlichen Ansätze der beiden Modelle ins Spiel – COPERT berücksichtigt dies via die gefahrenen Durchschnittsgeschwindigkeiten nach Straßentyp und Fahrzeugkategorie, TREMOD via die Verteilung der Fahrzeugkilo-

meter auf die HBEFA-Verkehrssituationen. Bei TREMOD kann ein fahrleistungsgewichtetes Mittel der Durchschnittsgeschwindigkeiten der den Verkehrssituationen zugeordneten Fahrprofile berechnet werden, welches mit den Durchschnittsgeschwindigkeiten von COPERT vergleichbar ist (Tabelle 16). Dabei zeigt sich, dass die in TREMOD durch die aus der Verteilung der Verkehrssituationen abgeleiteten Durchschnittsgeschwindigkeiten für die meisten Kombinationen von Fahrzeug- und Straßenkategorien deutlich über dem Input-Durchschnittsgeschwindigkeiten von COPERT liegen.

<b>Tabelle 16: Durchschnittsgeschwindigkeiten in COPERT und TREMOD nach Fahrzeug- und Straßenkategorie. Bei TREMOD handelt es sich um das fahrleistungsgewichtete Mittel der Durchschnittsgeschwindigkeiten der zugewiesenen Verkehrssituationen.</b>			
<b>Fahrzeugkategorie</b>	<b>Autobahn</b>	<b>Außerorts</b>	<b>Innerorts</b>
<b><i>COPERT, Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h]</i></b>			
PKW	107.6	66.9	30.3
LNF	107.8	67.4	30.1
SNF	84.7	65.8	23.1
Bus	100.5	49.1	21.9
KR	107.5	67.0	29.4
<b><i>TREMOD, abgeleitete Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h]</i></b>			
PKW	117.8	82.1	37.0
LNF	117.3	81.2	37.4
SNF	84.4	75.1	32.6
Linienbus	84.3	56.6	26.7
Reisebus	99.9	73.3	32.3
KR	124.3	84.9	41.4

### **Bestand**

Auch beim Fahrzeugbestand liegen die COPERT-AD anfangs über den TREMOD-Werten und fallen gegenüber diesen über die Zeitreihe kontinuierlich ab, die Unterschiede sind aber deutlich kleiner als bei den jährlichen Fahrleistungen (zwischen +0.1% und -5.4%). Die Unterschiede innerhalb der Fahrzeugkategorien gehen ebenfalls in die gleiche Richtung wie bei den Fahrleistungen (Abbildung 15). Auch auf niedrigeren Aggregationsstufen (Segment, Subsegment) lassen sich die bereits im Abschnitt zu den jährlichen Fahrleistungen beschriebenen Effekte wieder beobachten.

### **Spezifische Fahrleistungen**

Die spezifischen Fahrleistungen liegen im Durchschnitt aller Fahrzeuge am Anfang der Zeitreihe bei COPERT höher als bei TREMOD und nehmen im Verlauf der Zeitreihe gegenüber TREMOD ab. Allerdings liegen die spezifischen Fahrleistungen der PKW bei COPERT während der ganzen Zeitreihe unterhalb der TREMOD-Werte (abnehmend von -3% auf -11%), während sie bei LNF

und SNF 2000 über den TREMOD-Werten und gegen 2013 unterhalb liegen. Bei den Krafträdern schließlich unterstellt COPERT über die ganze Zeitreihe höhere spezifische Fahrleistungen als TREMOD (aber relativ gesehen auch von +60% auf +29% abnehmend). Diese Unterschiede sind, wie bei den gesamten Fahrleistungen, wiederum das Resultat von unterschiedlichen Grundannahmen zu den spezifischen Fahrleistungen sowie der Anpassung des Kraftstoffverbrauchs an den Absatz gemäß Statistik bei COPERT.

### **Start- und Stoppvorgänge**

Starts und Stopps werden bei COPERT nicht als solche erfasst, sondern als durchschnittliche Fahrdistanz; durch die Division der spezifischen Fahrleistung durch letztere kann jedoch die Anzahl Starts bzw. Stopps berechnet werden.

Die Anzahl Starts bzw. Stopps liegt bei COPERT höher als bei TREMOD – im Jahresdurchschnitt um 10% bei den PKW und um 16% bei den LNF. Bei COPERT werden durchschnittlich 2.8, bei TREMOD rund 2.5 Starts bzw. Stopps pro PKW und Tag unterstellt. Bei den LKW sind es 3.9 respektive 3.5 Starts oder Stopps pro Fahrzeug und Tag. Bei den Motorrädern ist der Unterschied am größten – während TREMOD von 3 Starts bzw. Stopps pro Tag ausgeht, sind es bei COPERT 4.5 Starts und Stopps pro Tag.

Abbildung 15: Vergleich der Ex-Post-Bestände gemäß TREMOD- und COPERT-Aktivitätsdatensätzen.



Quelle: Eigene Darstellung, Daten: IFEU, EMISIA

### 6.1.2. Trendszenario (Zeitraum 2014-2030)

Für den Zeitraum 2014-2030 wurden die Entwicklungen für Deutschland verglichen, die dem TREMOD-Trendszenario zugrunde liegen. Die Fahrzeugbestände für den Prognose-Zeitraum von COPERT wurden auf Basis der angenommen jährlichen Neuzulassungen und Überlebensfunktionen in TREMOD für dieses Forschungsvorhaben produziert; die Bestandsberechnung aus

diesen Informationen erfolgte im SIBYL-Modell von EMISIA und umfasst nur PKW (vgl. Kapitel 2.3.1).

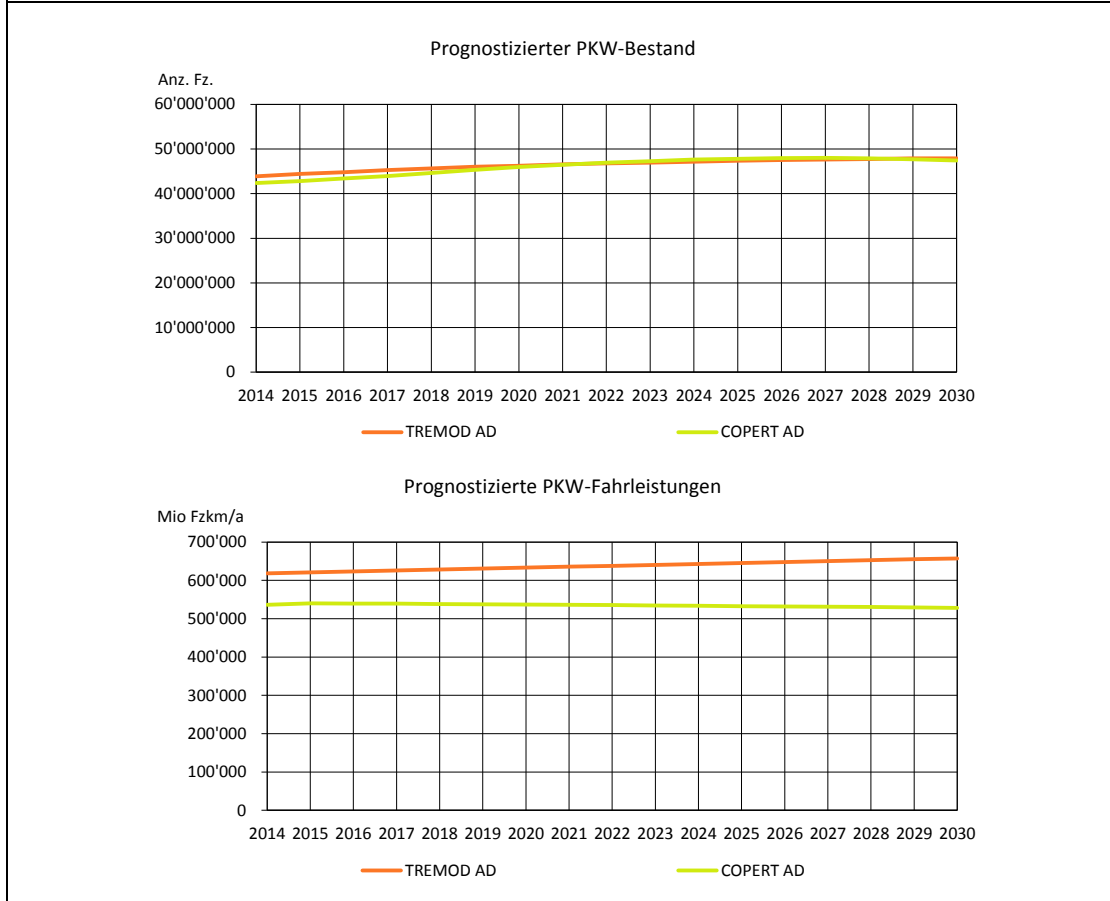
Während der prognostizierte PKW-Bestand der Aktivitätsdatensätze der beiden Modelle für den Zeitraum 2014-2030 sehr ähnlich ist, unterscheiden sich die Fahrleistungen deutlich: Zu Beginn der prognostizierten Zeitreihe (2014) liegen die Fahrleistungen gemäß COPERT um 12.5% niedriger als gemäß TREMOD; der Unterschied vergrößert sich bis 2030 auf 19.7% (Abbildung 16).

Der Unterschied ist also weitgehend in den Annahmen zu den spezifischen Fahrleistungen begründet. Diese nehmen in den Aktivitätsdaten beider Modelle kontinuierlich ab – in den TREMOD-AD von rund 14'000 auf rund 13'700 km pro Fahrzeug und Jahr zwischen 2014 und 2030, und in den COPERT-AD von rund 12'700 auf 11'300 km pro Fahrzeug und Jahr. Die Annahmen von COPERT bzw. SIBYL lehnen sich an die Energieverbrauchs-Prognosen des PRIMES-Energiemodells (E3MLab 2013) an<sup>12</sup>, diejenigen von TREMOD an die „Verflechtungsprognose“ 2030 (VP30) der Bundesverkehrswegeplanung (Intraplan 2014; s. auch Kapitel 5.6.2).

---

<sup>12</sup> PRIMES wird von der Europäischen Kommission für die Erarbeitung der europäischen Energiepolitik verwendet (s. z.B. EC 2014)

**Abbildung 16: Prognostizierter Bestand und Fahrleistungen von PKW bis 2030 gemäß TREMOD- und COPERT-Aktivitätsdaten (COPERT-Daten berechnet mit SIBYL).**

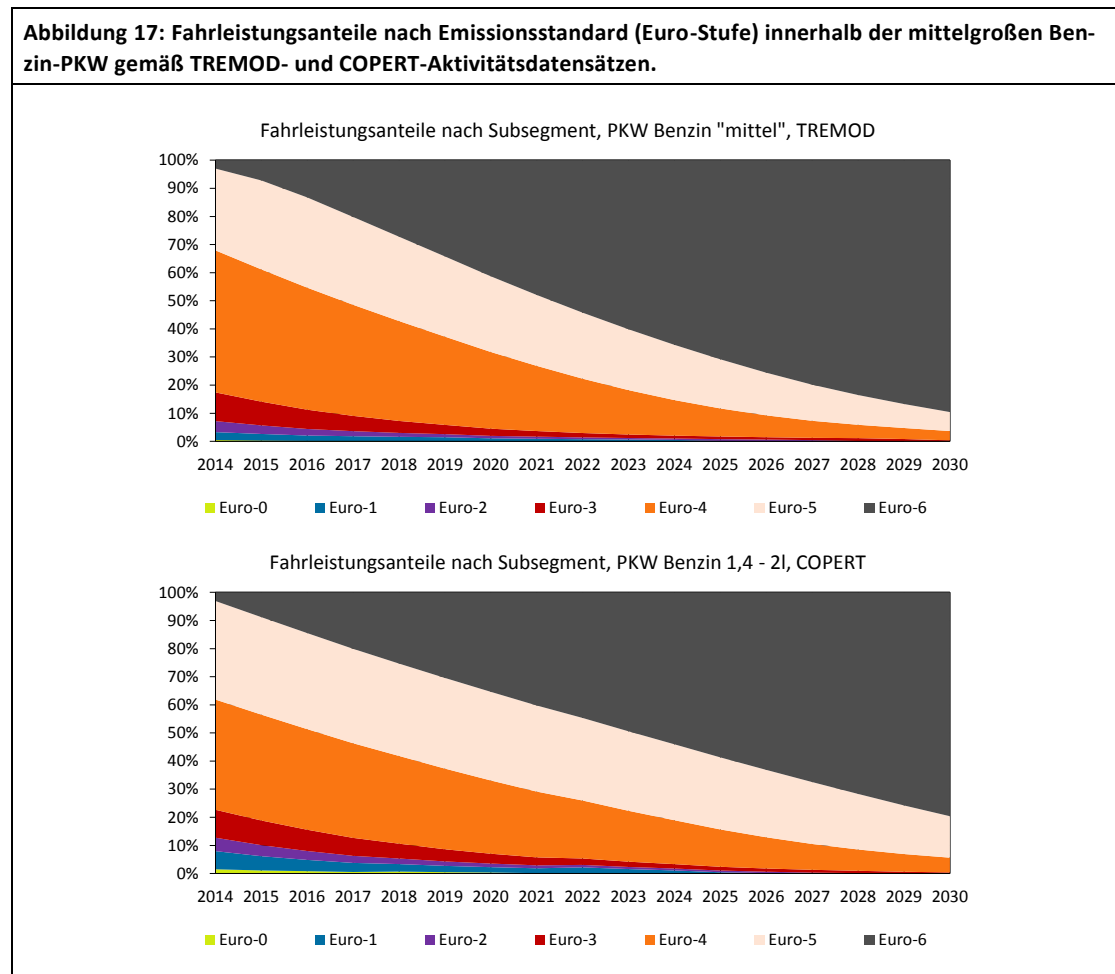


Quelle: Eigene Darstellung, Daten: IFEU, EMISIA

COPERT unterstellt auf Segment-Ebene eine raschere Verschiebung der Fahrleistungen zu Dieselfahrzeugen und alternativen Antrieben. Bis 2030 machen Diesel-PKW bei COPERT 58% der Fahrleistungen aus (basierend auf Annahmen von PRIMES), bei TREMOD nur 51%. Der Anteil der alternativen Antriebe steigt gemäß COPERT auf über 11% und bei TREMOD auf nur 7% - dies obwohl COPERT Batterie- und Plug-In-Fahrzeuge gar nicht berücksichtigt (Tabelle 17; die Anteile sind bei Fahrleistungen und Bestand fast identisch). Zu letzterem ist anzumerken, dass elektrische Antriebe in SIBYL berücksichtigt und auch in der 2016 erscheinenden Version COPERT 5 enthalten sein werden.

Tabelle 17: Fahrleistungsanteil innerhalb der PKW im Jahr 2030 nach Antrieb.		
Antrieb	Fahrleistungsanteil 2030	
	TREMOD	COPERT
Benzin	37.9%	30.3%
Diesel	51.3%	58.4%
CNG, LPG, Hybride	3.7%	11.3%
Batterie- und PlugIn-Elektrisch	7.2%	0%

Auf Subsegment-Ebene (Emissionsstandard) fällt auf, dass sich die Euro-6-Fahrzeuge gemäß den TREMOD-Aktivitätsdaten rascher durchsetzen und bis 2030 fast 90% der Fahrleistungen und 84% des Bestandes ausmachen als nach COPERT – hier beträgt der Anteil nur 79% der Fahrleistungen und 75% des Bestandes. Der Grund ist gemäß den Entwicklern von COPERT eine unterschiedliche Annahme zur initialen Altersverteilung des Bestandes (d.h. im Jahr 2014).



Quelle: Eigene Darstellung, Daten: IFEU, EMISIA



## 6.2. Emissionsfaktoren

### 6.2.1. Allgemeine Unterschiede

Der wichtigste Unterschied des Inputs Emissionsfaktoren reflektiert gleichzeitig die grundlegend unterschiedlichen Ansätze der beiden Modelle COPERT und TREMOD: Die COPERT-Emissionsfaktoren sind abhängig von der unterstellten Durchschnittsgeschwindigkeit auf Autobahnen, innerorts und außerorts, da sie in jedem Modellrun direkt aus Funktionen berechnet werden, in welche die Durchschnittsgeschwindigkeit als Eingangsparameter eingeht (vgl. Kap. 4.5.5). Die TREMOD-Emissionsfaktoren hingegen stellen das fahrleistungsgewichtete Mittel der HBEFA-Emissionsfaktoren der vorkommenden Verkehrssituationen dar. Bei beiden Modellen sind also die Emissionsfaktoren zu einem gewissen Maß abhängig von den Aktivitätsdaten. Es ist daher wichtig, zu beachten, dass sich der Vergleich in diesem Kapitel auf die zu den originalen Aktivitätsdaten des jeweiligen Modells passenden Emissionsfaktoren bezieht (welche in Kapitel 6.1.1 beschrieben sind und auch die Basis für die in Kapitel 7.1 beschriebene Vergleichsrechnung bilden).

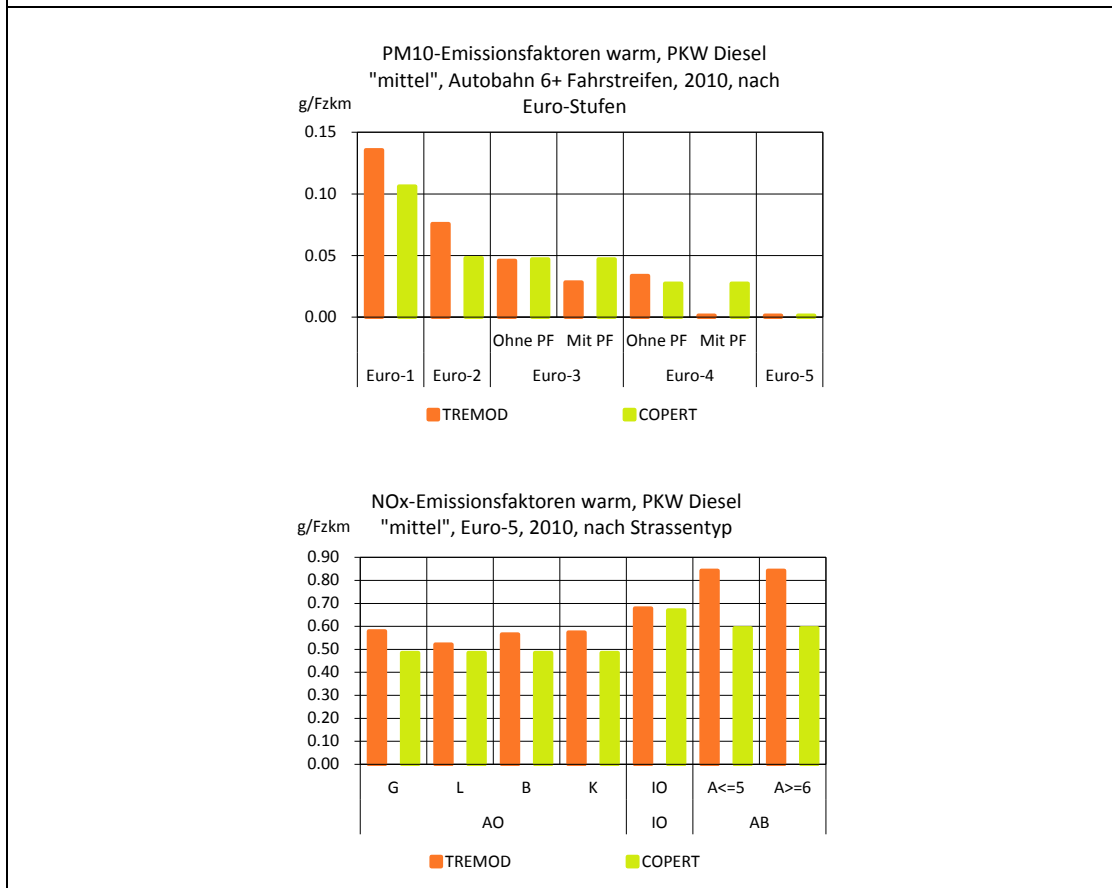
Der zweite generelle Unterschied ist die feinere Kategorisierung von TREMOD, sowohl was die Fahrzeugschichten betrifft als auch die Straßenkategorien. So werden bei TREMOD etwa bei Diesel-PKW die mit Partikelfilter (DPF) ausgerüsteten Fahrzeuge in einer separaten Fahrzeugschicht mit eigenen Emissionsfaktoren geführt; oder auf Autobahnen sowie auf außerorts-Straßen werden je nach Anzahl Fahrspuren respektive zuständiger administrativer Ebene unterschiedliche Emissionsfaktoren angewendet, welche aus unterschiedlichen Verteilungen der Verkehrssituationen hervorgehen (Abbildung 18).

Ein dritter genereller Unterschied ist die unterschiedliche Methodik der Kaltstart-Emissionsfaktoren. Während TREMOD Kaltstart-Emissionsfaktoren als Zuschläge pro Start in kaltem Motorzustand betrachtet (also in g/Start), so besteht der COPERT-Input einerseits in der durchschnittlichen Reisedistanz und andererseits im Verhältnis der Emissionen während der Aufwärmphase zu den Emissionen im warmen Zustand. Dies ist zwar an sich ein rein rechnerischer Unterschied – die Inputs beider Modelle können ineinander konvertiert werden. Trotzdem resultieren beispielsweise beim Kraftstoffverbrauch und beim CO<sub>2</sub> in COPERT rund dreimal so hohe Kaltstartzuschläge wie in TREMOD (vgl. auch Kapitel 7.1). Dies ist eine Folge der unterschiedlichen bei der Herleitung verwendeten Methoden (vgl. Kapitel 4.5.5, 5.5.5).

Viertens besteht eine allgemeine Tendenz (zu welcher es natürlich auch Gegenbeispiele gibt, beispielsweise die Kohlenwasserstoffe) darin, dass die Verbrauchs- und Emissionsfaktoren von COPERT mit der Zeit bzw. mit den Euro-Stufen weniger stark abnehmen als diejenigen von

TREMODO. Dies gilt sowohl für den Kraftstoffverbrauch, bei dem COPERT in den meisten Subsegmenten keine Abnahme (z.T. sogar eine Zunahme) des spezifischen Verbrauchs unterstellt, als auch für Schadstoffe wie  $\text{NO}_x$ , bei denen die TREMOD-Emissionsfaktoren bei den Euro-0-SNF noch höher liegen, aber bei Euro-V-Fahrzeugen mit SCR weniger als die Hälfte der COPERT-Pendants betragen. Dies lässt sich anhand der Abnahme der über alle Fahrzeugtypen und -kategorien gemittelten Verbrauchs- und Emissionsfaktoren zwischen 2000 und 2013 zeigen (Tabelle 18). Eine Ausnahme stellen nur die Kohlenwasserstoffe dar, bei denen COPERT sogar eine leicht stärkere Abnahme unterstellt.

**Abbildung 18: Zusätzliche Unterscheidungsmerkmale für Emissionsfaktoren in TREMOD: Partikelfilter-Ausstattung (PF, oben); zuständige administrative Ebene auf Außerorts-Straßen (AO) und Anzahl Fahrspuren und Anzahl Fahrstreifen auf Autobahnen (AB, unten).**



Quelle: Eigene Darstellung, Daten: IFEU, EMISIA

<b>Tabelle 18: Abnahme der durchschnittlichen (implizierten) Emissionsfaktoren über alle Fahrzeugkategorien zwischen 2000 und 2013 gemäß COPERT und TREMOD (fahrleistungsgewichtet nach originalen Aktivitätsdaten).</b>		
<b>Komponente</b>	<b>TREMOD</b>	<b>COPERT</b>
Kraftstoffverbrauch/CO <sub>2</sub>	-9%	-6%
NO <sub>x</sub>	-53%	-44%
PM10	-70%	-67%
HC	-68%	-69%

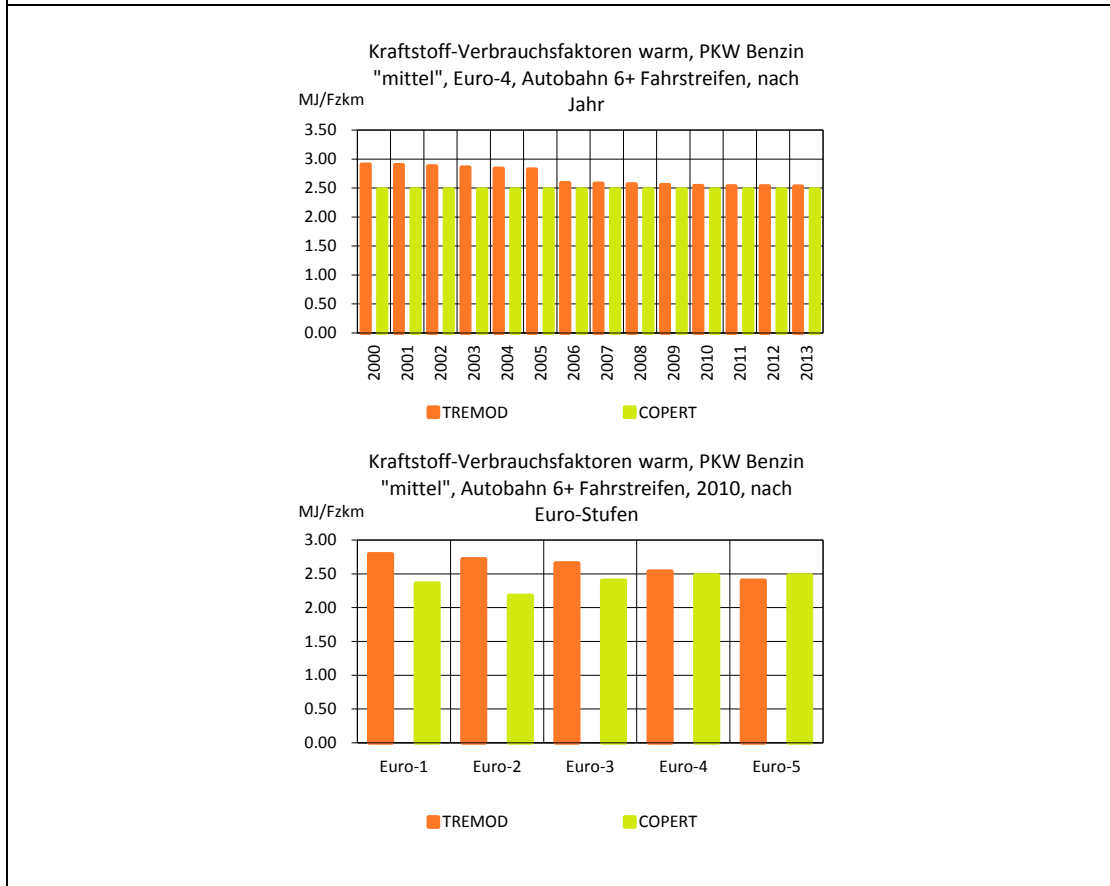
### 6.2.2. Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>

Die warmen Kraftstoffverbrauchs- und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren von TREMOD liegen etwas höher als die von COPERT (wobei der Unterschied über die betrachtete Zeitreihe abnimmt, s. Abbildung 19), während die Kaltstart-Faktoren von COPERT im Durchschnitt mehr als das Dreifache ausmachen (s. auch Kapitel 6.2.1 und 7.1). Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die unterstellte Eingangs-Durchschnittsgeschwindigkeit in den COPERT-Aktivitätsdaten signifikant tiefer liegt als die durch die Verkehrssituationen-Verteilung in TREMOD implizierte Durchschnittsgeschwindigkeit.

Weiter können folgende Unterschiede beobachtet werden:

- Innerhalb eines Subsegments (also z.B. mittelgroße Euro-4-Benzin-PKW) unterscheiden sich die Verbrauchs- und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren von TREMOD zwischen den Jahren, da hier die Effizienzverbesserung nach Baujahr aufgrund der Flottengrenzwerte einbezogen wird (Abbildung 19, oben). Die COPERT-Verbrauchsfaktoren sind hingegen konstant (vgl. Kapitel 4.5.4); die Effizienzgewinne beim Kraftstoffverbrauch werden also nicht nachvollzogen.
- Im Vergleich der Euro-Stufen nehmen die Verbrauchsfaktoren gemäß TREMOD ebenfalls ab, was natürlich auch Ausdruck der Effizienzverbesserung mit der Zeit ist (Abbildung 19, Mitte). Bei COPERT ist von Euro-1 bis Euro-5 in der Tendenz sogar eine Zunahme beobachtbar.

**Abbildung 19: Vergleich der Kraftstoffverbrauchsfaktoren mittelgroßer Benzin-PKW nach Jahr (oben, nur Euro-4-Fahrzeuge verschiedener Baujahre) und nach Euro-Stufe (unten, Bezugsjahr 2010).**



Quelle: Eigene Darstellung, Daten: IFEU, EMISIA

### 6.2.3. Stickoxide (NO<sub>x</sub>)

Die warmen Emissionsfaktoren der Stickoxide liegen bei Verwendung der originalen Inputdaten in TREMOD bei fast allen Fahrzeugkategorien im Durchschnitt höher als bei COPERT (wobei wie bereits erwähnt auch die implizierte Geschwindigkeit bei TREMOD höher liegt). Bei den SNF jedoch liegen die COPERT-Emissionsfaktoren höher, v.a. bei den jüngeren Euro-Stufen sowie bei den (in COPERT nicht separat berücksichtigten) SCR-Fahrzeugen (Abbildung 20; s. auch Abbildung 18).

Die Kaltstart-Emissionsfaktoren liegen im Durchschnitt anfangs der Zeitreihe bei COPERT nur rund 7% höher als diejenigen von TREMOD; bis 2013 liegen sie aber um über 300% höher. Dies liegt daran, dass TREMOD zum Teil – v.a. bei den Dieselfahrzeugen der neueren Euro-Stufen – negative Kaltstartzuschläge verwendet, d.h. die NO<sub>x</sub>-Emissionen liegen vor Erreichen der Betriebstemperatur niedriger als danach (dies hat physikalisch seine Begründung darin, dass

sich NO<sub>x</sub> vor allem bei hohen Temperaturen bildet). Bei COPERT hingegen kommen außer bei alten LPG-Motoren keine Cold start ratios unter 1 (was einem negativen Kaltstartzuschlag entspricht) vor.

**Abbildung 20: Vergleich der warmen NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren eines PKW-, eines LNF- und eines SNF-Seg- mentes nach Euro-Stufen. (Beachte in der untersten Abbildung: der Fahrleistungsanteil der Euro-IV- und Euro V Fahrzeuge mit EGR in TREMOD beträgt 25% und derjenige der SCR-Fahrzeuge 75% - der COPERT- Wert sollte also eher mit dem TREMOD-Wert für SCR-Fahrzeuge übereinstimmen).**



Quelle: Eigene Darstellung, Daten: IFEU, EMISIA

#### 6.2.4. Partikel (PM10, abgasbedingt)

Bei den Partikelemissionen besteht ein erster, grundlegender Unterschied zwischen COPERT und TREMOD darin, dass TREMOD nur die abgasbedingten Emissionen berücksichtigt. Die Partikelemissionen aus Abrieb und Aufwirbelung („PM non-exhaust“) sind in TREMOD nicht enthalten. COPERT enthält hingegen Emissionsfaktoren für Partikel aus beiden Quellen; sie können auch separat ausgegeben werden. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, beziehen sich die Ausführungen im vorliegenden Bericht ausschließlich auf die abgasbedingten Partikelemissionen.

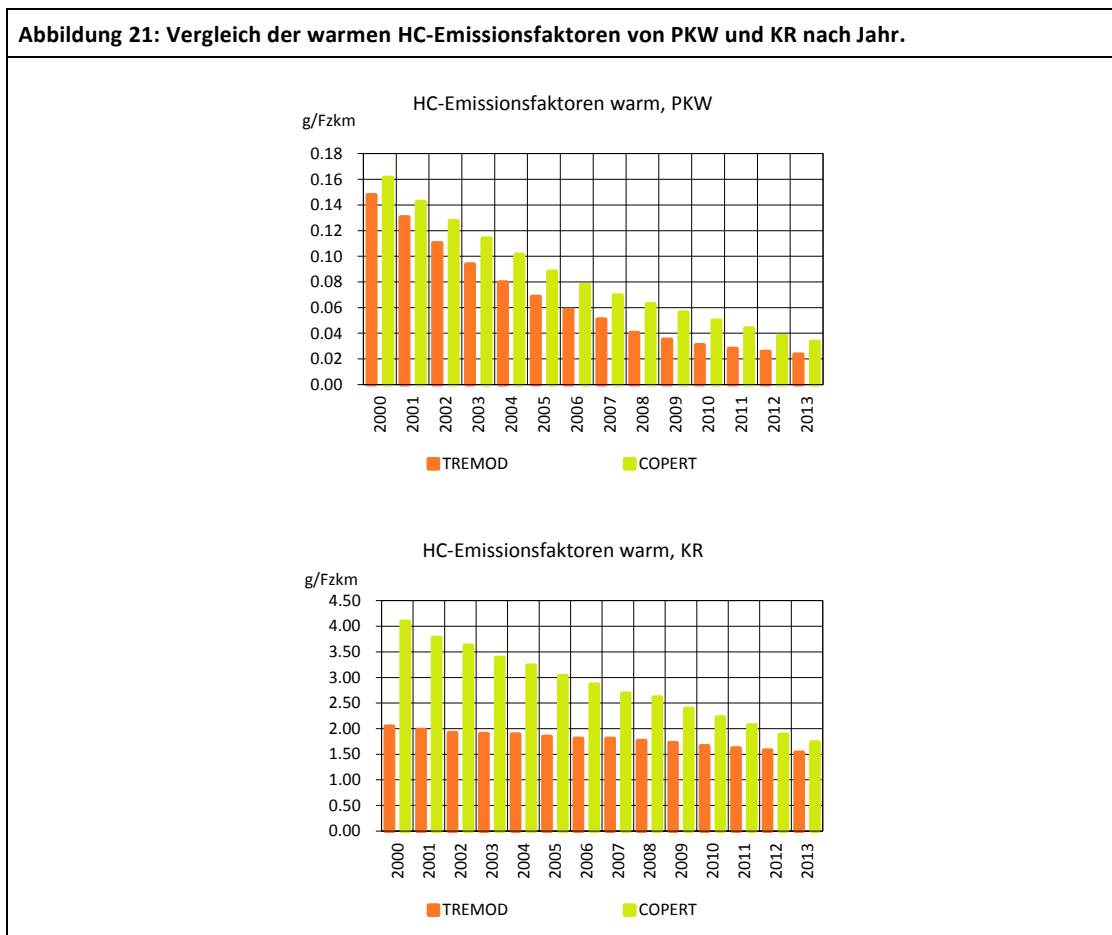
Auch wenn nur die abgasbedingten Emissionen betrachtet werden, liegen die Emissionsfaktoren von COPERT für den Durchschnitt aller Fahrzeugkategorien – mit Ausnahme der älteren Baujahre bei den PKW und den neueren Baujahre bei den Motorrädern – deutlich über denjenigen von TREMOD. Es sind nur einzelne Fahrzeugschichten, bei denen die Emissionsfaktoren von TREMOD höher liegen. Dies betrifft z.B. die Benzin-PKW, deren PM10-Emissionen aber absolut gesehen deutlich geringer sind als diejenigen der Dieselfahrzeuge, da ihre Emissionsfaktoren durchwegs um rund einen Faktor 10 tiefer liegen. Oder auch ältere Euro-Stufen bei den Diesel-PKW, welche über die Zeit eine zunehmend kleinere Rolle spielen; oder schließlich Diesel-PKW ohne Partikelfilter, wobei hier die Begründung v.a. darin liegt, dass COPERT die Partikelfilter-Ausstattung nicht separat berücksichtigt (Abbildung 18, oben).

#### 6.2.5. Kohlenwasserstoffe (HC)

Bei den Kohlenwasserstoffen ist erstens die hohe Bedeutung der Benzinfahrzeuge im Gegensatz zu den Dieselfahrzeugen und innerhalb der Benzinfahrzeuge die hohe Bedeutung der Zweitaktmotoren – d.h. also v.a. der Krafträder – zu betonen. Die Emissionen der Krafträder machen 22% (TREMOD) bzw. 26% (COPERT) der Gesamtemissionen im Jahr 2010 aus, während sie beim Kraftstoffverbrauch sowie bei den CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen gerade für 1% verantwortlich sind. Die HC-Emissionen der Krafträder (Summe aller Emissionsarten, also warm, Start und Verdunstung) liegen gemäß TREMOD zwischen rund 1.5 und 2 g/Fzkm und bei COPERT bei 1.5 bis über 4 g/Fzkm im betrachteten Zeitraum 2000-2013. Zum Vergleich liegen die gesamten HC-Emissionen bei PKW zwischen 0.02 und 0.2 g/Fzkm (bei beiden Modellen, wobei COPERT etwas höher liegt). Damit liegen die Emissionsfaktoren von COPERT bei der für diesen Schadstoff wichtigsten Fahrzeugkategorie gerade etwa beim Zweifachen der entsprechenden TREMOD-Werte, was sich auch auf die Emissionsresultate durchschlägt (vgl. Kapitel 7.1).

Zweitens unterscheiden sich die Kohlenwasserstoffe von den anderen Schadstoffen durch den hohen Anteil der Kaltstartzuschläge und den verschiedenen Arten von Verdampfungsemissionen (vgl. Abbildung 30). Und bei letzteren, insbesondere bei der Tankatmung, liegen die Emissionsfaktoren von COPERT im Durchschnitt etwa zehnmal so hoch wie diejenigen von TREMOD. Die größten Unterschiede sind bei den kleinen Benzin-PKW der Stufen Euro-1 bis Euro-3 festzustellen, deren Tankatmungs-Emissionsfaktor gemäß TREMOD bei 0.14 g pro Fahrzeug und Tag liegt und gemäß COPERT bei rund 2.8 g – also ca. das Zwanzigfache höher. Verglichen mit dem Typenprüfungs-Grenzwert von 2.0 g (Martini et al. 2012) erscheint der COPERT-Wert plausibler.

Die Gründe für diese Unterschiede sind nicht vollständig geklärt. Die in beiden Modelle einfließenden Klimadaten und RVP-Werte (Flüchtigkeit der Kraftstoffe) sind vergleichbar, und im Prinzip übernimmt HBEFA (und damit TREMOD) bei den Verdunstungsemissionen die Methodik von COPERT (s. auch Kapitel 5.5.5).



Quelle: Eigene Darstellung, Daten: IFEU, EMISIA

## 7. Vergleich der Modellresultate

### 7.1. Resultate unter Verwendung originaler Aktivitätsdaten

#### 7.1.1. Übersicht

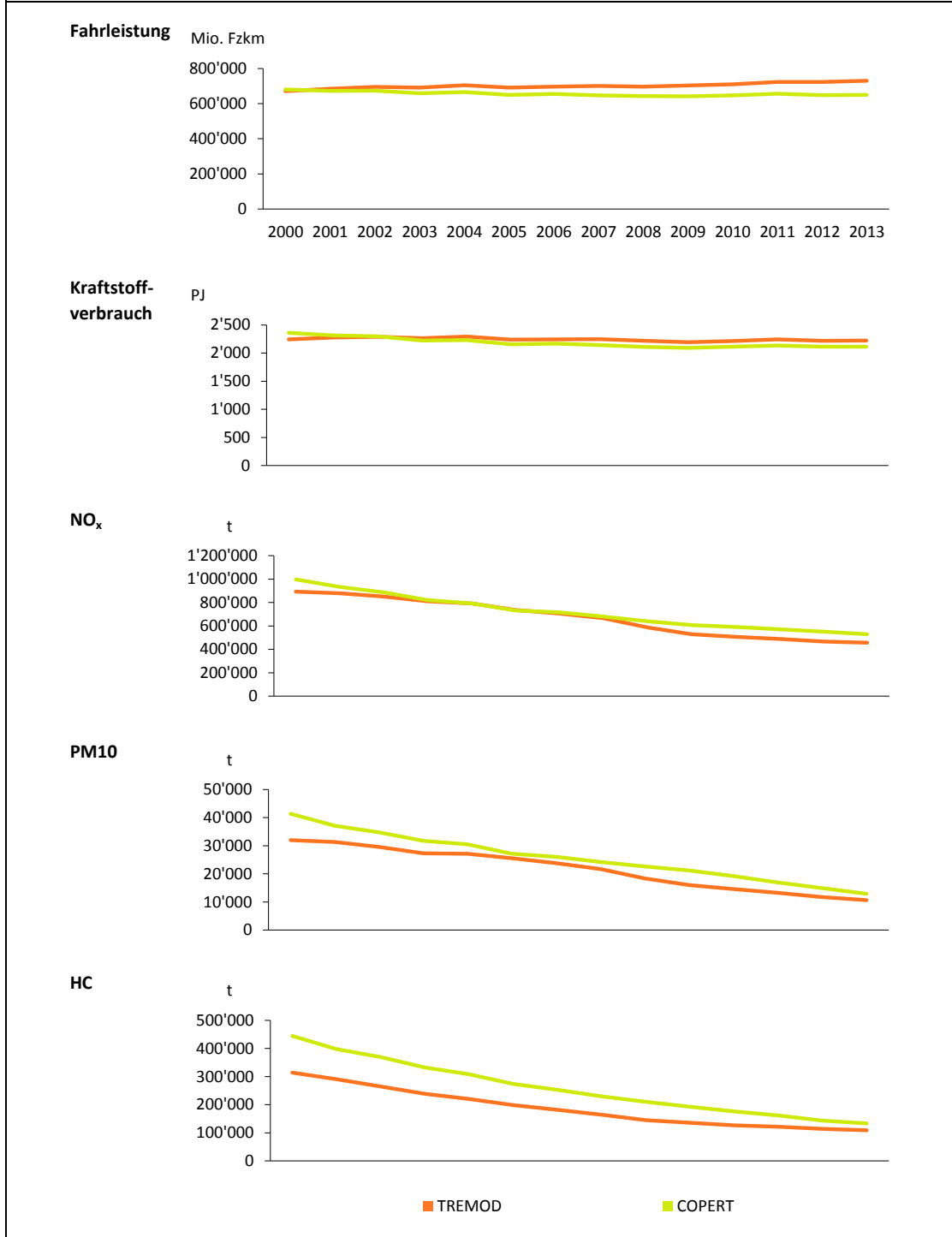
Die Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsresultate der beiden Modelle COPERT und TREMOD liegen bei Verwendung originaler Aktivitätsdaten zwar in der gleichen Größenordnung und zeigen ähnliche Trends, weisen aber signifikante, je nach Schadstoff stärkere oder weniger starke Unterschiede auf. Bei der Interpretation dieser Unterschiede ist es wichtig, sich die unterschiedlichen Inputs vor Augen zu halten. Dies betrifft die Aktivitäten (Fahrleistungen, Bestände, Starts und Stopps), die Flottenzusammensetzung, die Emissionsfaktoren und nicht zuletzt die unterstellten gefahrenen Geschwindigkeiten (COPERT) bzw. die Verteilung der Verkehrssituationen (TREMOD). Dabei sind v.a. die folgenden Unterschiede auffällig (vgl. Kapitel 6):

- Die Fahrleistungen liegen gemäß den TREMOD-Aktivitätsdaten höher, v.a. gegen Ende der Zeitreihe 2000-2013;
- Die Verbrauchs- und Emissionsfaktoren von COPERT nehmen mit der Zeit bzw. mit den Euro-Stufen für die Mehrheit der Fahrzeugschichten und Schadstoffe weniger stark ab als diejenigen von TREMOD;
- Die bei TREMOD durch die Verteilung der Verkehrssituationen implizierten Durchschnittsgeschwindigkeiten liegen deutlich über denjenigen von COPERT.

Als Resultat dieser Effekte liegt COPERT bei Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen generell leicht unter TREMOD und bei den Luftschadstoffemissionen leicht bis signifikant darüber (Abbildung 22). Die folgenden Kapitel beschreiben die Unterschiede und Gründe je Schadstoff.



Abbildung 22: Übersicht der Fahrleistungen und Emissionen 2000-2013 von COPERT und TREMOD unter Verwendung originaler Inputdaten.



Quelle: Eigene Darstellung; Daten: IFEU, EMISIA

## 7.1.2. Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>

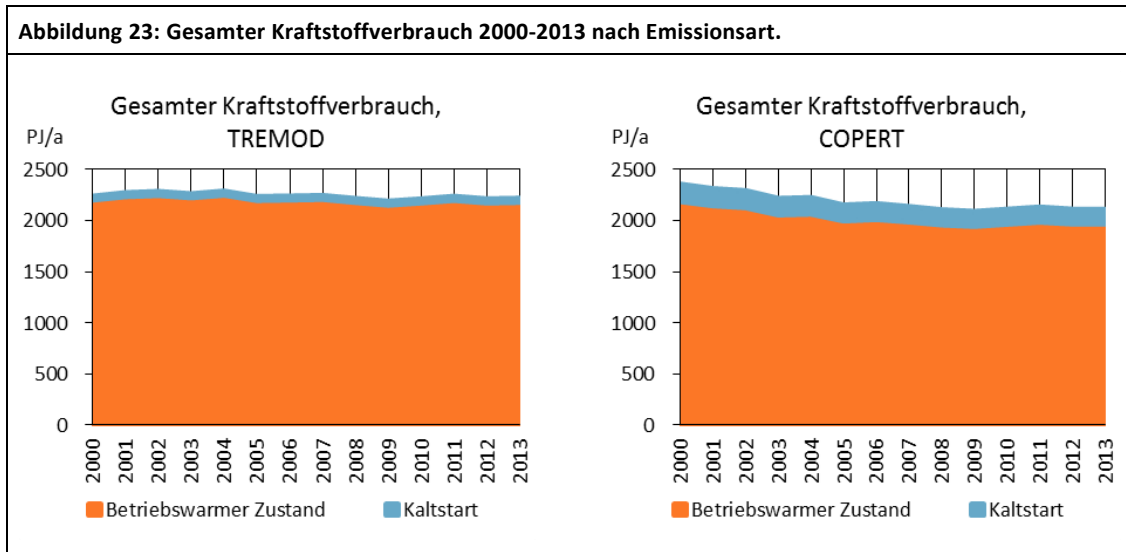
Der gesamte Kraftstoffverbrauch aller Fahrzeugkategorien gemäß COPERT liegt am Anfang der Zeitreihe (Jahr 2000) 5% über, aber ab 2003 um 2-5% unter dem gesamten Kraftstoffverbrauch von TREMOD. Der Kraftstoffverbrauch von COPERT stimmt für die Jahre 2000 und 2010 mit dem Verbrauch gemäß der offiziellen Statistik der AG Energiebilanzen (AGEB 2016) überein (Tabelle 19); die Fahrleistungen wurden dazu entsprechend kalibriert (vgl. Kapitel 4.5.4, 6.1.1). Die Werte gemäß TREMOD entsprechen den Resultaten der Bottom-Up-Berechnung nach dem Inlandsprinzip und können daher Abweichungen zur Energiebilanz (in TREMOD als eigenes Ergebnis abfragbar) aufweisen.

<b>Tabelle 19: Kraftstoffverbrauch des Straßenverkehrs in Deutschland gemäß offizieller Statistik (AG Energiebilanzen, AGEB) sowie gemäß den beiden Modellen COPERT und TREMOD unter Verwendung originaler Inputdaten.</b>					
<b>Jahr</b>	<b>Verbrauch gem. AGEB [PJ]</b>	<b>Verbrauch gem. TREMOD [PJ]</b>	<b>Verbrauch gem. COPERT [PJ]</b>	<b>Abweichung TREMOD [%]</b>	<b>Abweichung COPERT [%]</b>
2000	2'357	2'242	2'360	-5%	0%
2010	2'110	2'215	2'114	5%	0%

Quellen: IFEU 2014, IFEU, EMISIA

Der Anteil Kaltstartzuschläge ist in COPERT deutlich höher als in TREMOD (Abbildung 23, Tabelle 20). Betrachtet man nur die betriebswarmen Emissionen, so liegt COPERT über die gesamte Zeitreihe unter den TREMOD-Werten.

Bei den betriebswarmen Emissionen kompensieren somit die etwas höheren Emissionsfaktoren in COPERT die Unterschiede in den Fahrleistungen leicht. Die Kaltstart-Emissionen „kompensieren“ einen größeren Anteil, indem die Aktivitäten, also die Anzahl Start- und Stoppvorgänge, bei COPERT bereits etwas höher liegen als bei TREMOD, und die Emissionsfaktoren (d.h. die Kaltstartzuschläge) gleich um ein Mehrfaches (vgl. Kapitel 6.2.1, 6.2.2).



Quelle: Eigene Darstellung, Daten: IFEU, EMISIA

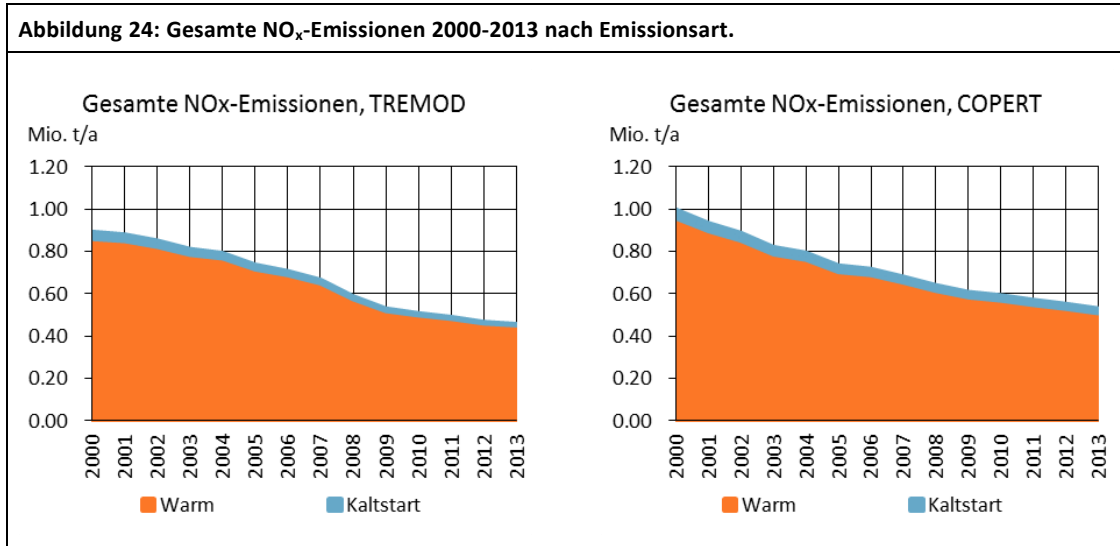
**Tabelle 20: Übersicht der relativen Differenzen im Kraftstoffverbrauch gemäß COPERT und TREMOD.**  
 $\phi$  = durchschnittliche Abweichung 2000-2013; Min./Max. = minimale/maximale jährliche Abweichung.  
 Die Farbschattierungen visualisieren das Ausmaß der Abweichung (rot = negativ, d.h. COPERT-Wert liegt tiefer; grün = positiv, d.h. COPERT-Wert liegt höher).

Gliederung	Kategorie	$\Delta$ COPERT-TREMOD [%]		
		$\phi$	Min.	Max.
Total	Gesamter Kraftstoffverbrauch	-3.0%	-5.0%	5.0%
Nach Betriebsart	Warm	-8.0%	-10.0%	-1.0%
	Kaltstart	258.0%	226.0%	305.0%
Nach Fahrzeug-kategorie	PKW	-6.0%	-7.0%	-5.0%
	LNF	14.0%	2.0%	33.0%
	SNF	4.0%	-7.0%	30.0%
	Busse	-9.0%	-14.0%	-4.0%
	KR	34.0%	14.0%	69.0%

### 7.1.3. Stickoxide (NO<sub>x</sub>)

Auch bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen liegen die Werte von COPERT trotz niedrigeren Fahrleistungen für den Großteil der Zeitreihe über denjenigen von TREMOD (Abbildung 23, Abbildung 24, Tabelle 21). Auch die Emissionsfaktoren der meisten Fahrzeugkategorien, inklusive der PKW und LNF, liegen bei COPERT tiefer als bei TREMOD (vgl. Kapitel 6.2.3). Den absolut gesehen bedeutendsten Ausschlag für die höheren Emissionen bei COPERT geben die SNF (obwohl der Unterschied bei den Kaltstart-Emissionen in Prozent ausgedrückt höher liegt). Hier liegen sowohl die

Fahrleistungen bei COPERT höher als auch die NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren – letztere v.a. bei den jüngeren Fahrzeugen.



Quelle: Eigene Darstellung, Daten: IFEU, EMISIA

**Tabelle 21: Übersicht der relativen Differenzen der NO<sub>x</sub>-Emissionen gemäß COPERT und TREMOD.**  
 $\phi$  = durchschnittliche Abweichung 2000-2013; Min./Max. = minimale/maximale jährliche Abweichung.  
 Die Farbschattierungen visualisieren das Ausmaß der Abweichung (rot = negativ, d.h. COPERT-Wert liegt tiefer; grün = positiv, d.h. COPERT-Wert liegt höher).

Gliederung	Kategorie	$\Delta$ COPERT-TREMOD [%]		
		$\phi$	Min.	Max.
Total	Gesamtemissionen	8.0%	-1.0%	18.0%
Nach Emissionsart	Warm	7.0%	-2.0%	15.0%
	Kaltstart	110.0%	22.0%	352.0%
Nach Fahrzeug-kategorie	PKW	-8.0%	-14.0%	0.0%
	LNF	-12.0%	-20.0%	-1.0%
	SNF	29.0%	13.0%	55.0%
	Busse	-3.0%	-12.0%	6.0%
	KR	14.0%	5.0%	28.0%

#### 7.1.4. Partikel (PM<sub>10</sub>, abgasbedingt)

Auch die abgasbedingten PM<sub>10</sub>-Emissionen liegen gemäß COPERT deutlich über den Emissionen von TREMOD (Abbildung 23, Tabelle 22). Die gesamten Emissionen sind „warm“ – zusätzliche Kaltstart-Emissionen gibt es beim Feinstaub nicht.

Mit Ausnahme älterer PKW und neuerer KR liegen denn auch die Emissionsfaktoren von COPERT deutlich höher als diejenigen von TREMOD (vgl. Kapitel 6.2.4). Sie überkompensieren somit die geringeren Fahrleistungen in COPERT und sind so ausschlaggebend für die Unterschiede.

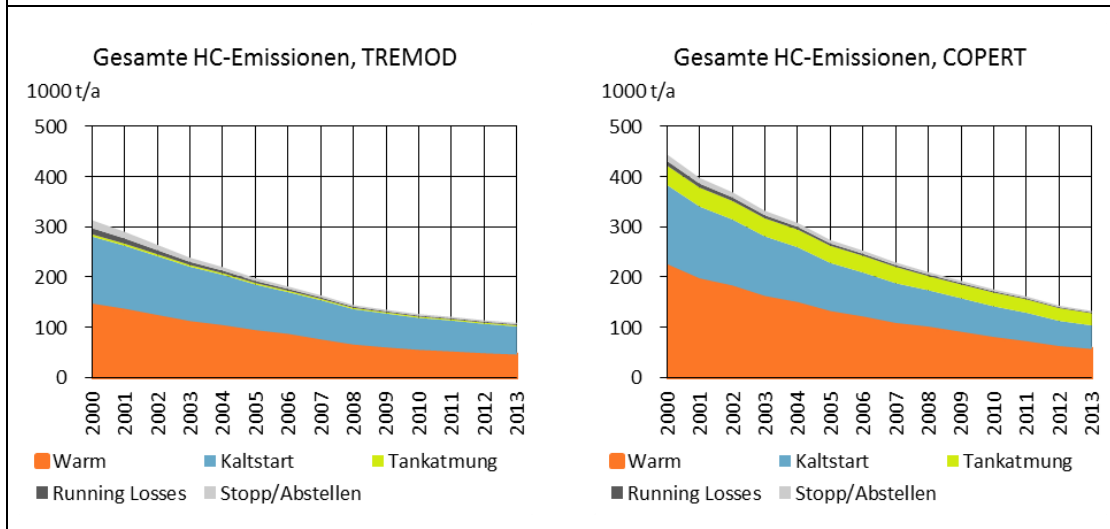
<b>Tabelle 22: Übersicht der relativen Differenzen der abgasbedingten PM10-Emissionen gemäß COPERT und TREMOD.</b>				
<b>∅ = durchschnittliche Abweichung 2000-2013; Min./Max. = minimale/maximale jährliche Abweichung. Die Farbschattierungen visualisieren das Ausmaß der Abweichung (rot = negativ, d.h. COPERT-Wert liegt tiefer; grün = positiv, d.h. COPERT-Wert liegt höher).</b>				
Gliederung	Kategorie	Δ COPERT-TREMOD [%]		
		∅	Min.	Max.
Total	Gesamtemissionen	20.0%	6.0%	32.0%
Nach Emissionsart	Warm	20.0%	6.0%	32.0%
Nach Fahrzeug-kategorie	PKW	10.0%	-13.0%	38.0%
	LNF	22.0%	15.0%	33.0%
	SNF	35.0%	12.0%	69.0%
	Busse	16.0%	1.0%	26.0%
	KR	28.0%	-31.0%	124.0%

### 7.1.5. Kohlenwasserstoffe (HC)

Bei den Kohlenwasserstoff-Emissionen ist der bereits bei den anderen Schadstoffen beobachtete Effekt am stärksten: Trotz niedrigerer Fahrleistungen liegen die Emissionen gemäß COPERT über die gesamte Zeitreihe um ein Drittel bis die Hälfte höher als gemäß TREMOD (Abbildung 23, Abbildung 25, Tabelle 23). Anteilsmäßig fällt zudem bei COPERT der um ein Vielfaches höhere Anteil an Tankatmungs-Emissionen auf.

Für diese Unterschiede sind die deutlich höheren Emissionsfaktoren von COPERT ausschlaggebend. Das sind einerseits diejenigen der Krafträder, deren kombinierte Emissionen aus allen Emissionsarten umgerechnet auf den Fahrzeugkilometer höher liegen als bei allen anderen Fahrzeugkategorien. Die höchsten relativen Unterschiede finden sich bei den Tankatmungs-Emissionen, wobei Benzin-PKW bis Euro-3 die größten Differenzen aufweisen (vgl. Kapitel 6.2.5).

Abbildung 25: Gesamte HC-Emissionen nach Emissionsart, 2000-2013.



Quelle: Eigene Darstellung, Daten: IFEU, EMISIA

**Tabelle 23: Übersicht der relativen Differenzen der HC-Emissionen gemäß COPERT und TREMOD.**  
 $\emptyset$  = durchschnittliche Abweichung 2000-2013; Min./Max. = minimale/maximale jährliche Abweichung.  
 Die Farbschattierungen visualisieren das Ausmaß der Abweichung (rot = negativ, d.h. COPERT-Wert liegt tiefer; grün = positiv, d.h. COPERT-Wert liegt höher).

Gliederung	Kategorie	$\Delta$ COPERT-TREMOD [%]		
		$\emptyset$	Min.	Max.
Total	Gesamtemissionen	37.0%	22.0%	45.0%
Nach Emissionsart	Warm	43.0%	24.0%	54.0%
	Kaltstart	2.0%	-16.0%	18.0%
	Tankatmung	974.0%	811.0%	1059.0%
	Running Losses	4.0%	-26.0%	35.0%
	Stopp/Abstellen	17.0%	-18.0%	47.0%
Nach Fahrzeugkategorie	PKW	29.0%	19.0%	37.0%
	LNF	-5.0%	-25.0%	23.0%
	SNF	17.0%	6.0%	40.0%
	Busse	45.0%	8.0%	76.0%
	KR	103.0%	33.0%	216.0%

## 7.2. Resultate bei Verwendung gleicher Aktivitätsdaten

### 7.2.1. Übersicht

Bei der Verwendung gleicher Aktivitätsdaten, d.h. der Verwendung der TREMOD- Aktivitätsdaten für COPERT für Zehnjahresschritte 1990-2030 sowie die Fahrzeugkategorien PKW, LNF und SNF, resultieren für Kraftstoffverbrauch und alle betrachteten Schadstoffe in der Mehrheit der

vergleichenen Jahre höhere Werte bei COPERT als bei TREMOD (Abbildung 26). Da die gleichen Aktivitätsdaten verwendet wurden, sind die Begründungen für die verbleibenden Unterschiede in den Emissionsfaktoren zu suchen (vgl. daher auch Kapitel 6.2). Bei den HC-Emissionen ist zu beachten, dass die Krafträder, bei denen die größten Unterschiede der Emissionsfaktoren zu beobachten sind, nicht Teil der in diesem Kapitel beschriebenen Vergleichsrechnung sind.

Tendenziell kann beobachtet werden, dass sich die höheren Werte bei COPERT vor allem in der Periode 2010-2030 akzentuieren, während in den Jahren 1990 und 2000 die COPERT-Ergebnisse zum Teil noch unter den TREMOD-Werten liegen. Dies liegt an den sich tendenziell mit der Zeit bzw. mit den Euro-Stufen vergrößernden Unterschieden in den Emissionsfaktoren, welche v.a. auf eine weniger starke Absenkung in COPERT als in TREMOD zurückgehen (vgl. Kapitel 6.2).

Da schon bei der Verwendung der originalen Aktivitätsdaten, wo TREMOD generell höhere Fahrleistungen aufweist, Verbrauch und Emissionen gemäß COPERT oft höher liegen (s. Kapitel 7.1), so vergrößern sich diese Differenzen in der Tendenz eher, wenn in COPERT ebenfalls höhere Fahrleistungen unterstellt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Effekt bei den SNF umgekehrt ist, da diesen in den originalen COPERT-Aktivitätsdaten höhere Fahrleistungen zugeordnet sind und sie v.a. bei den Stickoxiden und Partikelemissionen einen überproportional großen Anteil an den Gesamtemissionen haben. Daher ist beispielsweise die Abweichung der gesamten PM10-Emissionen im Jahr 2010 trotz insgesamt höherer Fahrleistungen kleiner als bei Verwendung originaler Inputdaten.

Die Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit auf das in den TREMOD-Daten implizierte Niveau (vgl. Tabelle 16) hat je nach Straßenkategorie und Kurvenform der verwendeten Emissionsfaktoren-Funktion unterschiedliche Auswirkungen. Für die Innerorts-Straßen bedeutet eine Erhöhung der Geschwindigkeit eine Verschiebung Richtung Minimum der meisten Emissionsfaktoren-Funktionen, bewirkt also niedrigere Emissionsresultate. Für Außerorts-Straßen und Autobahnen hingegen resultieren höhere Geschwindigkeiten für viele Subsegmente auch in höheren Emissionsfaktoren.

Abbildung 26: Fahrleistungen und Emissionen von COPERT und TREMOD unter Verwendung gleicher Inputdaten, Zehnjahresschritte 1990-2030 (nur PKW, LNF und SNF). Die Abweichungen in % beziehen sich auf den jeweiligen TREMOD-Wert (also COPERT-Wert/TREMOD-Wert – 100%).



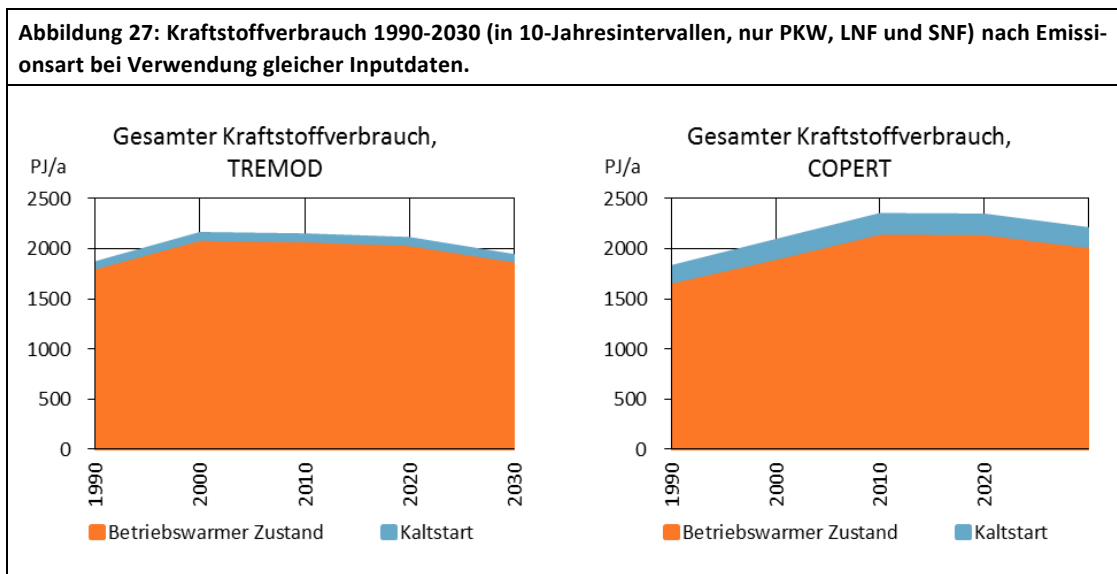
Eigene Darstellung; Daten: IFEU, EMISIA



Die Unterschiede in der Flottenzusammensetzung in den originalen Inputdaten haben unterschiedliche Effekte auf Verbrauch und Emissionen von COPERT, wenn dessen Inputs an TREMOD angeglichen werden: So sinkt der Anteil Diesel-PKW, welche einen leicht niedrigeren spezifischen Verbrauch aufweisen, in COPERT mit der Verwendung der TREMOD-Inputdaten. Bei den SNF hingegen bewirkt der Wechsel auf TREMOD-Inputs einen höheren Anteil schwerer Last-/Sattelzüge und damit einen Anstieg des Verbrauchs und der Emissionen. Bei den LNF ist die Flottenzusammensetzung bereits in den originalen Aktivitätsdaten sehr ähnlich.

### 7.2.2. Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>

Bei Verwendung gleicher Inputdaten liegen Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen von COPERT für die Jahre 1990 und 2000 2% - 3% unter denjenigen von TREMOD, in den späteren Jahren um 10% höher (Abbildung 26, Abbildung 27). Dies liegt, wie bereits erwähnt, daran, dass die Kraftstoffverbrauchsfaktoren von TREMOD eine Effizienzverbesserung unterstellen, welche in den Faktoren von COPERT nicht zum Ausdruck kommt. Die absolut gesehen größten Unterschiede liegen bei den Kaltstart-Emissionen, aufgrund der um ein Mehrfaches höheren Kaltstartzuschläge von COPERT.



Quelle: Eigene Darstellung, Daten: IFEU, EMISIA

Die Tatsache, dass die Input-Fahrleistungen nun auch bei COPERT statistischen Daten bzw. nach 2013 den aus der Verkehrsprognose 2030 abgeleiteten Daten entsprechen, erlaubt einen Vergleich des modellierten Kraftstoffverbrauchs mit dem Verbrauch gemäss AG Energiebilanzen (AGEB 2016) und einen Rückschluss auf die Kraftstoffverbrauchsfaktoren. Zwar schließt die in diesem Kapitel beschriebene Vergleichsrechnung nur die Fahrzeugkategorien PKW, LNF und

SNF mit ein; für das Jahr 2010 überschätzt aber die unkalibrierte COPERT-Modellrechnung bereits ohne Berücksichtigung der Busse und Krafträder den Kraftstoffverbrauch um 11% (Tabelle 24). Die Überschätzung wäre bei Berücksichtigung aller Fahrzeugkategorien noch höher. Dies ist ein starkes Indiz dafür, dass die realen Kraftstoffverbrauchsfaktoren ab 2000 eher wie in TREMOD sinken. Zu beachten ist, dass die CO<sub>2</sub>-Korrektur (vgl. Kap. 4.5.4) für diese Vergleichsrechnung (im Gegensatz zur Vergleichsrechnung mit originalen Aktivitätsdaten) auf die Kraftstoffverbrauchs- und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren appliziert wurde. Aus der CO<sub>2</sub>-Korrektur resultieren aber nur für die PKW-Größenklassen unter 2l Hubraum leichte Effizienzverbesserungen – für die großen PKW steigen jedoch wegen der hohen Gewichtung des (im Durchschnitt steigenden) Fahrzeuggewichts die Verbrauchsfaktoren innerhalb der gleichen Euro-Stufe. Im Durchschnitt aller PKW resultiert für COPERT ein Anstieg des spezifischen Energieverbrauchs um 10% zwischen 2000 und 2010. Gemäß TREMOD nimmt der spezifische Energieverbrauch in der gleichen Zeitspanne um 9% ab.

Jahr	Verbrauch gem. AGEb [PJ]	Verbrauch gem. TREMOD [PJ]	Verbrauch gem. COPERT [PJ]	Abweichung TREMOD [%]	Abweichung COPERT [%]
2000	2'357	2'145	2'075	-9%	-12%
2010	2'110	2'132	2'334	1%	11%

Quellen: IFEU 2014, IFEU, EMISIA

Auf Segment-Ebene bestätigt sich, dass sich die Unterschiede in Verbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen mit der Zeit vergrößern; zudem wird sichtbar, dass die größeren Unterschiede in den Verbrauchsfaktoren bei den Benzinfahrzeugen liegen (Tabelle 25).

Auf Subsegment-Ebene zeigen sich schließlich zwei Effekte (Tabelle 26): Einerseits die relative Zunahme der COPERT- gegenüber den TREMOD-Werten mit den Jahren innerhalb der gleichen Euro-Stufe (also auf den Zeilen von Tabelle 26), welche daraus entsteht, dass TREMOD eine Reduktion des spezifischen Kraftstoffverbrauchs mit zunehmendem Baujahr unterstellt und COPERT nicht. Andererseits die relative Zunahme der COPERT- gegenüber den TREMOD-Werten im gleichen Referenzjahr zwischen den Euro-Stufen (Spalten in Tabelle 26), welche ursächlich auf die gleiche Effizienzzunahme zurückgeht, welche sich auch im Mittel der Euro-Stufen ausdrückt.

**Tabelle 25: Übersicht der relativen Differenzen des Kraftstoffverbrauchs von PKW gemäß COPERT und TREMOD, nach Segment, bei gleichen Inputdaten (COPERT/TREMOD - 100%). Die Umstellung auf Kaufsegmente bei TREMOD erklärt einen Teil der Veränderungen innerhalb der Größenklassen zwischen 2000 und 2010.**

Die Farbschattierungen visualisieren das Ausmaß der Abweichung (rot = negativ, d.h. COPERT-Wert liegt tiefer; grün = positiv, d.h. COPERT-Wert liegt höher).

Antrieb/Größenklasse	1990	2000	2010	2020	2030
Benzin klein	-4.8%	-4.1%	-2.2%	-1.7%	-0.9%
Benzin mittel	-10.9%	-14.0%	-0.3%	1.1%	2.4%
Benzin groß	-22.9%	-22.1%	12.9%	25.4%	34.0%
Diesel klein	n/a	n/a	-2.7%	-2.0%	0.5%
Diesel mittel	-7.1%	-2.4%	5.7%	4.6%	5.9%
Diesel groß	-21.8%	-7.6%	14.9%	12.1%	12.1%
CNG/LPG (alle)	n/a	n/a	-8.3%	-0.6%	12.4%
Hybride (alle)	n/a	n/a	-27.0%	-12.2%	-10.9%
<b>Alle PKW</b>	<b>-8.9%</b>	<b>-11.4%</b>	<b>7.5%</b>	<b>8.9%</b>	<b>7.4%</b>

**Tabelle 26: Übersicht der relativen Differenzen des Kraftstoffverbrauchs von mittelgroßen Benzin-PKW gemäß COPERT und TREMOD, nach Euro-Stufe (Subsegment), bei gleichen Inputdaten (COPERT/TREMOD - 100%). Die Umstellung auf Kaufsegmente bei TREMOD erklärt einen Teil der Veränderungen innerhalb der Größenklassen zwischen 2000 und 2010.**

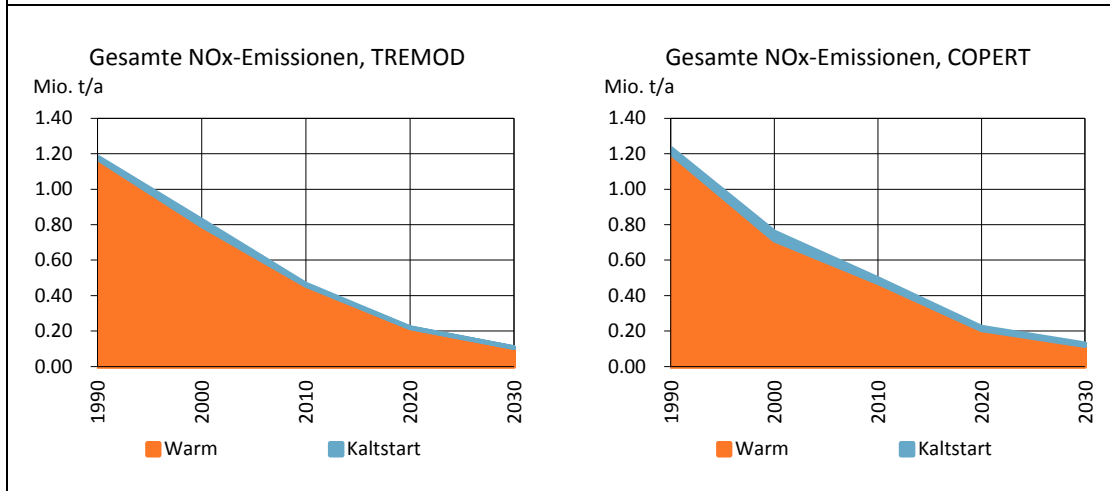
Die Farbschattierungen visualisieren das Ausmaß der Abweichung (rot = negativ, d.h. COPERT-Wert liegt tiefer; grün = positiv, d.h. COPERT-Wert liegt höher).

Euro-Stufe	1990	2000	2010	2020	2030
Euro-0	-22.3%	-22.2%	0.2%	-6.6%	n/a
Euro-1	-23.8%	-22.6%	-4.9%	-5.3%	n/a
Euro-2	n/a	-19.5%	-0.5%	-0.7%	3.3%
Euro-3	n/a	-27.0%	-9.8%	-9.2%	-7.8%
Euro-4	n/a	-13.1%	27.0%	29.1%	29.6%
Euro-5	n/a	n/a	27.9%	33.6%	36.1%
Euro-6	n/a	n/a	14.3%	29.2%	34.9%

### 7.2.3. Stickoxide (NO<sub>x</sub>)

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen von COPERT liegen bei der Verwendung gleicher Inputdaten in den meisten Jahren (ausser 2000) leicht über denjenigen von TREMOD. Im Jahr 2030 beträgt der relative Unterschied mit 20% etwas mehr, bewegt sich aber auf tiefem absolutem Niveau. Die großen Unterschiede in den Kaltstartzuschlägen, welche bei Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub> beobachtet werden, sind bei den Stickoxiden relativ gesehen im Vergleich der Modelle auch vorhanden, machen aber einen viel kleineren Anteil an den Gesamtemissionen aus und fallen daher nicht stark ins Gewicht (Abbildung 26, Abbildung 28).

**Abbildung 28: NO<sub>x</sub>-Emissionen 1990-2030 (in 10-Jahresintervallen, nur PKW, LNF und SNF) nach Emissionsart bei Verwendung gleicher Inputdaten.**



Eigene Darstellung; Daten: IFEU, EMISIA

Auf Segment-Ebene zeigt sich, dass die relativen Unterschiede zwischen den Modellen bei den Benzin-PKW generell größer sind als bei den Diesel-PKW; wegen der höheren spezifischen NO<sub>x</sub>-Emissionen der Dieselfahrzeuge dominieren jedoch diese den Effekt auf die Gesamtemissionen (Tabelle 27).

Auf Subsegment-Ebene, also differenziert nach Euro-Stufe, werden die unterschiedlichen Detaillierungsgrade der Modelle hinsichtlich Fahrzeugschichten deutlich: Obwohl die NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren innerhalb einer Fahrzeugschicht über die Zeit konstant sind, ändern sich die Unterschiede zwischen den Modellen auch innerhalb der gleichen Euro-Stufe nach Referenzjahr (Tabelle 28). Dieser Effekt ist, neben wechselnden Anteilen Kaltstart-Emissionen und leicht unterschiedlichen Verteilungen der Emissionen auf Straßenkategorien, dem Umstand geschuldet, dass TREMOD auch innerhalb der Euro-Stufen weitere Fahrzeugschichten differenziert, z.B. Fahrzeuge mit und ohne Partikelfilter (vgl. Kapitel 6.2.3), und dass die Fahrleistungsverteilung nach Alter oder Straßentyp sowie Verschlechterungsfaktoren mitberücksichtigt werden. Dieselben Effekte machen sich auch bei den Emissionen nach Straßenkategorie bemerkbar (Tabelle 29).

**Tabelle 27: Übersicht der relativen Differenzen der NO<sub>x</sub>-Emissionen von PKW gemäß COPERT und TREMOD, nach Segment, bei gleichen Inputdaten (COPERT/TREMOD - 100%).**  
Die Farbschattierungen visualisieren das Ausmaß der Abweichung (rot = negativ, d.h. COPERT-Wert liegt tiefer; grün = positiv, d.h. COPERT-Wert liegt höher).

Antrieb/Größenklasse	1990	2000	2010	2020	2030
Benzin klein	12.0%	-7.6%	-34.9%	-24.6%	1.0%
Benzin mittel	10.3%	-24.3%	-38.8%	-31.8%	-1.3%
Benzin groß	45.2%	-20.3%	-39.7%	-42.0%	-11.0%
Diesel klein	n/a	n/a	6.0%	-4.5%	34.1%
Diesel mittel	-17.5%	-5.9%	1.3%	-6.4%	34.8%
Diesel groß	7.8%	-6.7%	-0.4%	-6.9%	23.1%
CNG/LPG (alle)	n/a	n/a	-56.0%	-49.9%	-35.8%
Hybride (alle)	n/a	n/a	-73.8%	-30.5%	-30.1%
<b>Alle PKW</b>	<b>5.8%</b>	<b>-15.3%</b>	<b>-10.3%</b>	<b>-9.8%</b>	<b>20.7%</b>

**Tabelle 28: Übersicht der relativen Differenzen der NO<sub>x</sub>-Emissionen von großen Diesel-PKW gemäß COPERT und TREMOD, nach Euro-Stufe, bei gleichen Inputdaten (COPERT/TREMOD - 100%).**  
Die Farbschattierungen visualisieren das Ausmaß der Abweichung (rot = negativ, d.h. COPERT-Wert liegt tiefer; grün = positiv, d.h. COPERT-Wert liegt höher).

Euro-Stufe	1990	2000	2010	2020	2030
Euro-0	21.2%	29.4%	24.5%	n/a	n/a
Euro-1	-8.6%	-7.8%	-6.4%	-6.5%	n/a
Euro-2	n/a	-8.8%	-7.9%	-7.9%	-7.8%
Euro-3	n/a	-4.6%	-3.7%	-3.0%	-2.7%
Euro-4	n/a	n/a	8.5%	7.6%	7.1%
Euro-5	n/a	n/a	-13.7%	-13.8%	-13.4%
Euro-6	n/a	n/a	-21.7%	-4.8%	36.9%

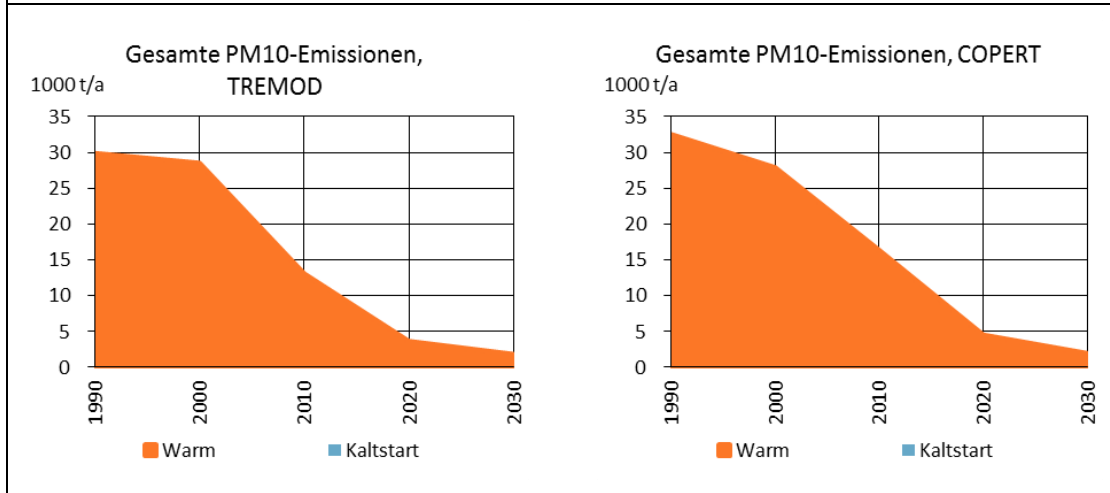
**Tabelle 29: Übersicht der relativen Differenzen der NO<sub>x</sub>-Emissionen gemäß COPERT und TREMOD, nach Straßenkategorie, bei gleichen Inputdaten (COPERT/TREMOD - 100%).**  
Die Farbschattierungen visualisieren das Ausmaß der Abweichung (rot = negativ, d.h. COPERT-Wert liegt tiefer; grün = positiv, d.h. COPERT-Wert liegt höher).

Straßenkategorie	1990	2000	2010	2020	2030
Autobahn	3.9%	-14.4%	10.3%	-7.5%	-0.5%
Ausserorts	2.5%	-6.4%	3.0%	-2.5%	14.2%
Innerorts	0.5%	-6.1%	-6.8%	-4.3%	24.7%

#### 7.2.4. Partikel (PM<sub>10</sub>, abgasbedingt)

Die Partikelemissionen sind gemäß COPERT in allen Jahren außer 2000 höher als gemäß TREMOD. Hier werden keine Kaltstarts modelliert (Abbildung 26, Abbildung 29).

Abbildung 29: PM10-Emissionen 1990-2030 (in 10-Jahresintervallen, nur PKW, LNF und SNF) nach Emissionsart bei Verwendung gleicher Inputdaten.



Eigene Darstellung; Daten: IFEU, EMISIA

Auf Segment-Ebene zeigt sich wiederum ein klarer Unterschied zwischen Benzin- und Diesel-PKW (Tabelle 30). Bei den Benzin-PKW liegen die Emissionen gemäß COPERT unterhalb denjenigen von TREMOD; bei den Dieselfahrzeugen liegen jedoch die COPERT-Werte höher, was aufgrund der allgemein höheren spezifischen PM10-Emissionen von Dieselfahrzeugen im Vergleich mit Benzinfahrzeugen ausschlaggebend für den Gesamtunterschied ist.

Innerhalb der Diesel-PKW liegt COPERT neben den Euro-0- vor allem bei den Euro-4- und Euro-5-Fahrzeugen über TREMOD. Bei den Euro-1- und -2-Fahrzeugen sind die Emissionsfaktoren von COPERT niedriger als von TREMOD, was auch die niedrigeren Gesamtemissionen im Jahr 2000 erklärt.

**Tabelle 30: Übersicht der relativen Differenzen der PM10-Emissionen von PKW gemäß COPERT und TREMOD, nach Segment, bei gleichen Inputdaten (COPERT/TREMOD - 100%).**  
Die Farbschattierungen visualisieren das Ausmaß der Abweichung (rot = negativ, d.h. COPERT-Wert liegt tiefer; grün = positiv, d.h. COPERT-Wert liegt höher).

Antrieb/Größenklasse	1990	2000	2010	2020	2030
Benzin klein	-77.9%	-68.8%	-51.1%	-26.9%	-19.3%
Benzin mittel	-78.9%	-72.3%	-58.5%	-32.4%	-23.7%
Benzin groß	-81.5%	-77.7%	-69.4%	-47.7%	-31.1%
Diesel klein	n/a	n/a	203.2%	196.9%	26.3%
Diesel mittel	65.0%	-3.3%	76.5%	105.4%	17.9%
Diesel groß	57.2%	-7.3%	64.7%	61.9%	39.1%
CNG/LPG (alle)	n/a	n/a	-62.4%	-54.4%	-48.5%
Hybride (alle)	n/a	n/a	-100.0%	-100.0%	-100.0%
<b>Alle PKW</b>	<b>18.4%</b>	<b>-19.9%</b>	<b>46.1%</b>	<b>38.1%</b>	<b>7.4%</b>

**Tabelle 31: Übersicht der relativen Differenzen der PM10-Emissionen von großen Diesel-PKW gemäß COPERT und TREMOD, nach Euro-Stufe, bei gleichen Inputdaten (COPERT/TREMOD - 100%).**  
Die Farbschattierungen visualisieren das Ausmaß der Abweichung (rot = negativ, d.h. COPERT-Wert liegt tiefer; grün = positiv, d.h. COPERT-Wert liegt höher).

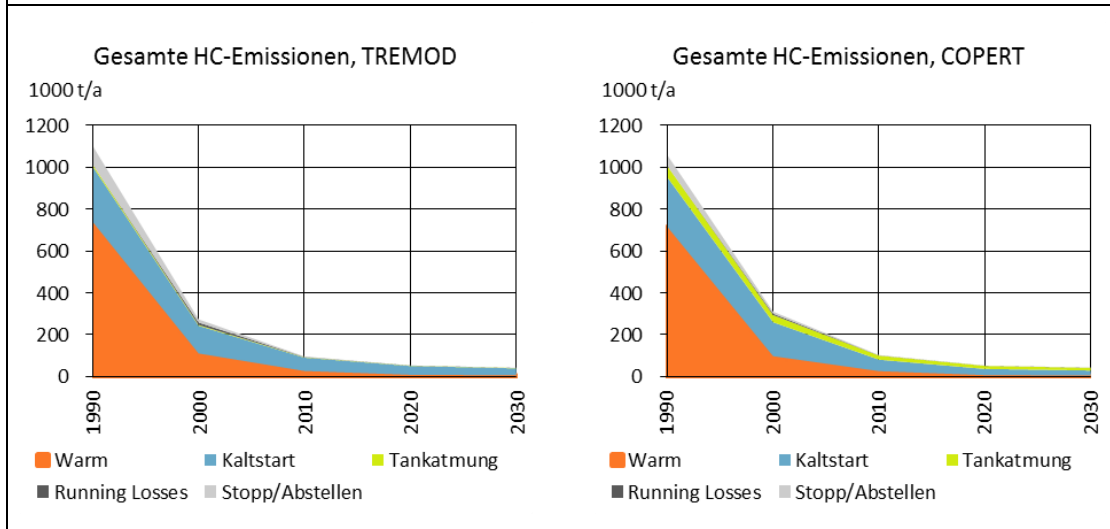
Euro-Stufe	1990	2000	2010	2020	2030
Euro-0	104.7%	122.0%	109.7%	n/a	n/a
Euro-1	-5.4%	-8.9%	-14.8%	-14.6%	n/a
Euro-2	n/a	-22.0%	-20.8%	-21.0%	-21.1%
Euro-3	n/a	35.8%	30.0%	30.0%	27.9%
Euro-4	n/a	n/a	288.3%	342.7%	338.6%
Euro-5	n/a	n/a	62.4%	62.6%	62.0%
Euro-6	n/a	n/a	10.9%	11.0%	11.1%

### 7.2.5. Kohlenwasserstoffe (HC)

Die bei der Modellierung mit originalen Inputdaten festgestellten hohen Abweichungen zwischen COPERT- und TREMOD-Resultaten verschwinden bei der Verwendung gleicher Inputdaten weitgehend (Abbildung 26, Abbildung 30). Dies liegt zu einem guten Teil auch daran, dass die Krafträder, bei welchen die Emissionsfaktoren bei COPERT um ein Mehrfaches über denjenigen von TREMOD liegen, nicht Teil der Vergleichsrechnung mit gleichen Inputdaten sind.

Der Vergleich der Emissionen nach Emissionsart (Tabelle 32) zeigt, dass bei den Tankanlauf-Emissionen nach wie vor COPERT um das fünf- bis Zehnfache über TREMOD liegt (vgl. auch Kapitel 6.2.5). Bei den Running Losses und den Emissionen nach Warm-/Heissabstellen liegt TREMOD höher, allerdings „nur“ um maximal rund 45%, und gegen Ende der Zeitreihe nimmt dieser Unterschied ab bzw. kehrt sich beim Warm-/Heissabstellen sogar um.

**Abbildung 30: HC-Emissionen 1990-2030 (in 10-Jahresintervallen, nur PKW, LNF und SNF) nach Emissionsart bei Verwendung gleicher Inputdaten.**



Eigene Darstellung; Daten: IFEU, EMISIA

**Tabelle 32: Differenzen der HC-Emissionen von COPERT und TREMOD (PKW, LNF und SNF) nach Emissionsart bei gleichen Inputdaten (COPERT/TREMOD - 100%).**

Jahr	Betriebs-warmer Zu-stand	Kaltstart	Tankatmung	Running Losses	Stopp/ Ab-stellen
1990	-3%	-10%	479%	n/a	-43%
2000	-12%	22%	841%	-44%	-36%
2010	-3%	-14%	991%	-38%	-17%
2020	-16%	-30%	940%	-15%	10%
2030	-25%	-27%	1021%	-2%	24%

### 7.3. Sensitivitätsanalyse

#### 7.3.1. COPERT: Verwendung der Durchschnittsgeschwindigkeiten der TREMOD-Verkehrssituationen

In der im vorigen Kapitel durchgeführten Vergleichsrechnung wurden für COPERT die Durchschnittsgeschwindigkeiten je Straßenkategorie (Innerorts, Außerorts, Autobahn) verwendet. Durch die Sensitivitätsanalyse mit COPERT mit der Verwendung der Durchschnittsgeschwindigkeiten je TREMOD-Verkehrssituation bedeutet eine weitere Annäherung der COPERT- an die TREMOD-Recheninputs. Diese geht über die „normale“ Nutzung von COPERT hinaus: Die Diffe-



renzung nach mehr Kategorien als den drei Standard-COPERT-Straßentypen ist in der COPERT-Software nicht vorgesehen und erfordert in der Durchführung etwas höheren Aufwand, da der eine Modellrun als Workaround auf mehrere aufgeteilt werden muss.

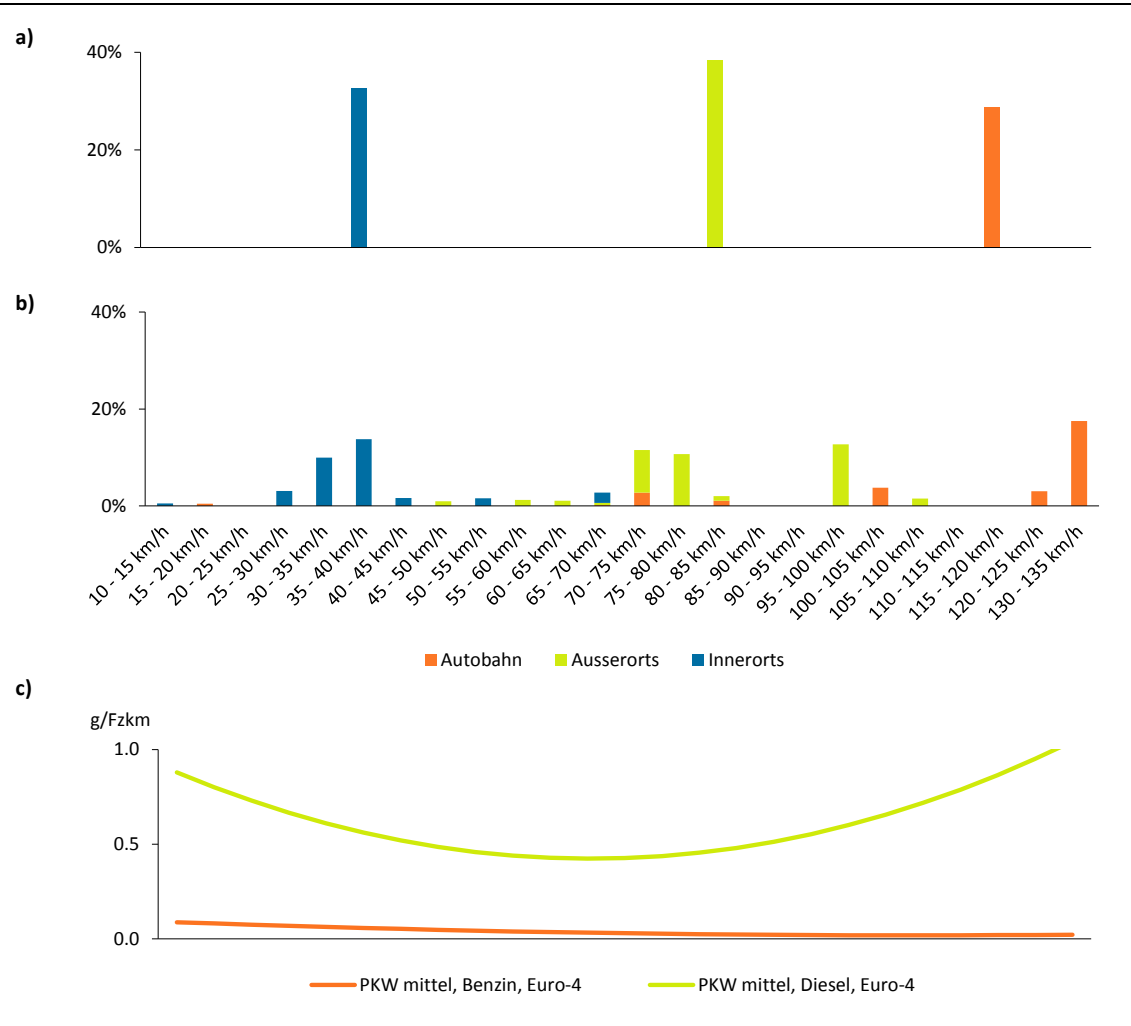
Die Veränderung der Inputs gegenüber den für Kapitel 7.2 verwendeten Eingangsdaten ist in Abbildung 31 graphisch dargestellt: Anstatt wie im Referenzfall die gesamten Fahrleistungen in drei Teile, als auf drei Straßenkategorien mit jeweils einer Durchschnittsgeschwindigkeit aufzuteilen (oberste Grafik in Abbildung 31), werden sie in der Sensitivitätsrechnung auf Geschwindigkeitsintervalle von je 5 km/h aufgeteilt, die den Durchschnittsgeschwindigkeiten der Verkehrssituationen von TREMOD entsprechen (mittlere Grafik in Abbildung 31). Die Rechnung wird also differenzierter durchgeführt. Zuunterst in Abbildung 31 sind am Beispiel von Euro-4-PKW die geschwindigkeitsabhängigen Funktionen für die Errechnung der NO<sub>x</sub>-Emissionen für Diesel- bzw. Benzinfahrzeuge aufgezeichnet, deren Höhe an der Position der jeweiligen Fahrleistungsbalken den Wert der für diese Fahrleistungen verwendeten Emissionsfaktoren visualisiert.

Die Sensitivitätsrechnung resultiert durchwegs, d.h. für alle betrachteten Jahre und Schadstoffe, in höheren Emissionen als der Referenzfall (welcher mit dem in Kapitel 7.2 beschriebenen Modellrun identisch ist). Die Unterschiede bewegen sich in der Größenordnung von 1% - 9%. Es findet somit nicht eine Annäherung der Resultate an diejenigen von TREMOD statt, sondern die Unterschiede zwischen den Modellen werden größer.

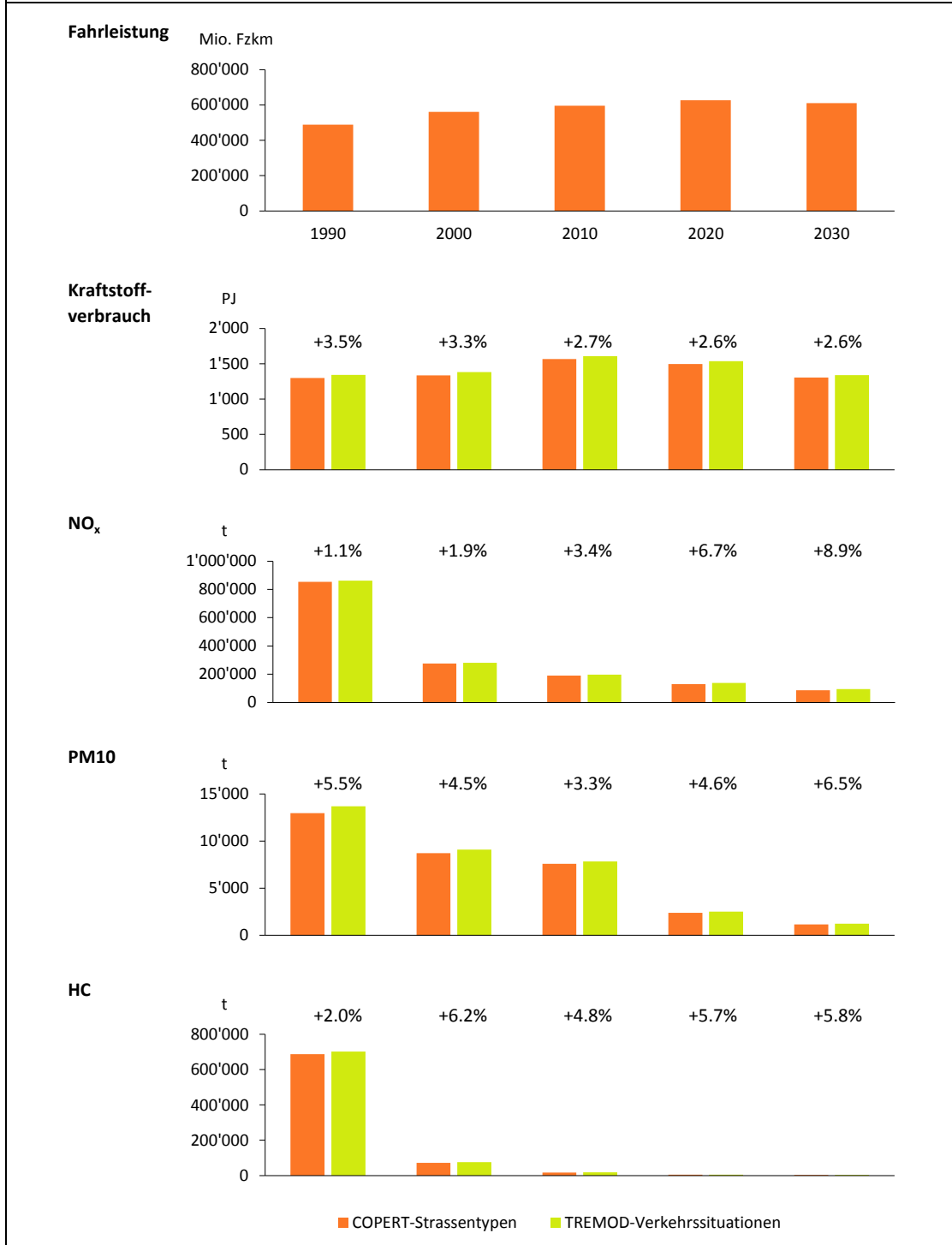
Dies ist ein direkter Effekt der feineren Differenzierung, da fast alle Funktionen zur geschwindigkeitsabhängigen Ermittlung der Emissionsfaktoren in COPERT kurvenförmig, mit den tiefsten Wertebereichen in der Mitte des Geschwindigkeitsspektrums, verlaufen. Jeder Punkt auf einer solchen Kurve stellt ein relatives Minimum gegenüber dem Durchschnitt weiter außen gelegener Punkte dar. Werden nun also anstelle eines einzigen Emissionsfaktors an einer beliebigen Stelle auf einer solchen Kurve mehrere Faktoren von beidseitig weiter außen auf der Kurve verwendet, so resultiert im Mittel ein leicht höherer Emissionsfaktor. Dieser Effekt ist in Abbildung 33 grafisch dargestellt; Tabelle 33 zeigt die Auswirkungen anhand der Emissionsfaktoren von Euro-4-PKW (Benzin und Diesel). Tatsächlich sind die Emissionen fast aller Subsegmente, mit Ausnahme der NO<sub>x</sub>- und PM<sub>10</sub>-Emissionen einiger Euro-0-Fahrzeuge und alternativen Antrieben, in der Sensitivitätsrechnung höher als im Referenzfall. Derselbe Effekt wurde auch von Smit et al. (2008) festgestellt.

Umgekehrt bedeutet dies, dass COPERT in der normalen Anwendung, also bei der Mittelung der Geschwindigkeiten unterschiedlicher Verkehrssituationen, Verbrauch und Emissionen relativ zu einem Modellrun mit stärker differenzierten Inputs leicht unterschätzt. Die Outputs sind also nicht aggregationsneutral, d.h. bei unterschiedlichen Aggregationsniveaus der Inputs resultieren leicht andere Outputs.

**Abbildung 31: Verteilung der Fahrleistungen nach Geschwindigkeitsklasse:**  
**a) Originale COPERT-Strasstypen und zugehörige Durchschnittsgeschwindigkeit (Referenzfall)**  
**b) Unter Verwendung der Verkehrssituationen in Deutschland (Sensitivitätsrechnung)**  
**c) Zum Vergleich: NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren für Euro-4-PKW (Diesel/Benzin) in Abhängigkeit der Geschwindigkeit**

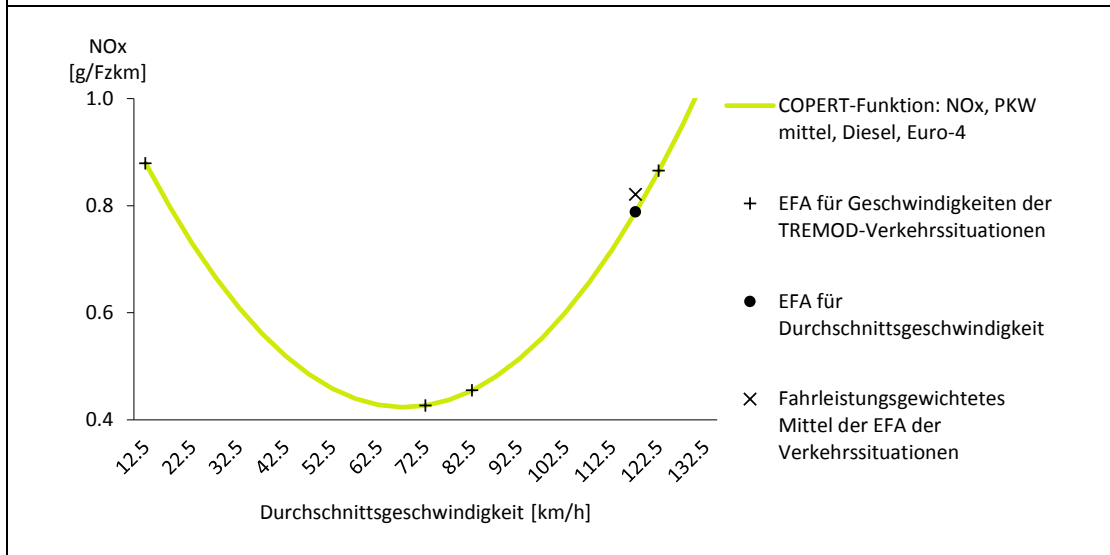


**Abbildung 32: Fahrleistungen und Emissionen mit COPERT unter Verwendung der COPERT-Strasstypen sowie unter Verwendung der TREMOD-Verkehrssituationen mit der entsprechenden Durchschnittsgeschwindigkeit.**



Eigene Darstellung; Daten: EMISIA

**Abbildung 33: Grafische Darstellung des Effektes der Erhöhung des durchschnittlichen Emissionsfaktors bei Differenzierung nach Verkehrssituationen für kurvenförmige COPERT-Funktionen mit dem Minimum bei mittleren Geschwindigkeiten, am Beispiel der NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren mittelgroßer Diesel-Euro-4-PKW auf Autobahnen.**



Eigene Darstellung; Daten: EMISIA

**Tabelle 33: NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren zweier PKW-Subsegmente für COPERT im Referenzfall und der Sensitivitätsanalyse. Die Werte der Sensitivitätsanalyse entsprechen dem fahrleistungsgewichteten Mittel der Emissionsfaktoren, die für die Durchschnittsgeschwindigkeiten der eingehenden Verkehrssituationen resultieren.**

	PKW mittel, Benzin, Euro-4			PKW mittel, Diesel, Euro-4		
	Referenz	Sensitivität	Diff. [%]	Referenz	Sensitivität	Diff. [%]
Autobahn	0.019	0.022	18%	0.788	0.821	4%
Außerorts	0.024	0.026	6%	0.455	0.483	6%
Innerorts	0.057	0.058	1%	0.561	0.574	2%

### 7.3.2. TREMOD: Verdopplung des Stop&Go- und Saturated-Anteils

Die Sensitivitätsanalyse mit TREMOD testet den Einfluss der Verteilung der Levels of Service (LOS) innerhalb der statischen (d.h. geografisch determinierten) Parameter der Verkehrssituationen. Während es bei der Zuordnung der Fahrleistungen aus einem Verkehrsmodell zu den statischen Verkehrssituationen (also Umgebungstyp, Straßenkategorie und Geschwindigkeitslimit) kaum Fehlerquellen gibt (sofern Karten- und Verkehrsmodell-Inputs stimmen), so ist die Aufteilung der Fahrleistungen auf die vier LOS mit größeren Unsicherheiten behaftet. Daher interessiert es, wie groß der Einfluss dieser Verteilung auf die Verbrauchs- und Emissionsresultate ist.

In der Sensitivitätsrechnung werden die Anteile der beiden LOS mit dichtem Verkehr, also „Stop&Go“ (Stau) und „Saturated“ (gesättigt), gegenüber dem Referenzfall (welcher dem in Kapitel 7.2 beschriebenen TREMOD-Modellrun entspricht), verdoppelt; die Anteile „Freeflow“ und „Heavy“ werden proportional verringert, damit die Summe wieder 100% entspricht. Die Anteile der vier LOS im Referenzfall und in der Sensitivitätsrechnung sind in Tabelle 34 dargestellt. Die unterschiedlichen Anteile der LOS pro Bezugsjahr ergeben sich durch die Fahrleistungsanteile nach Straßentypen.

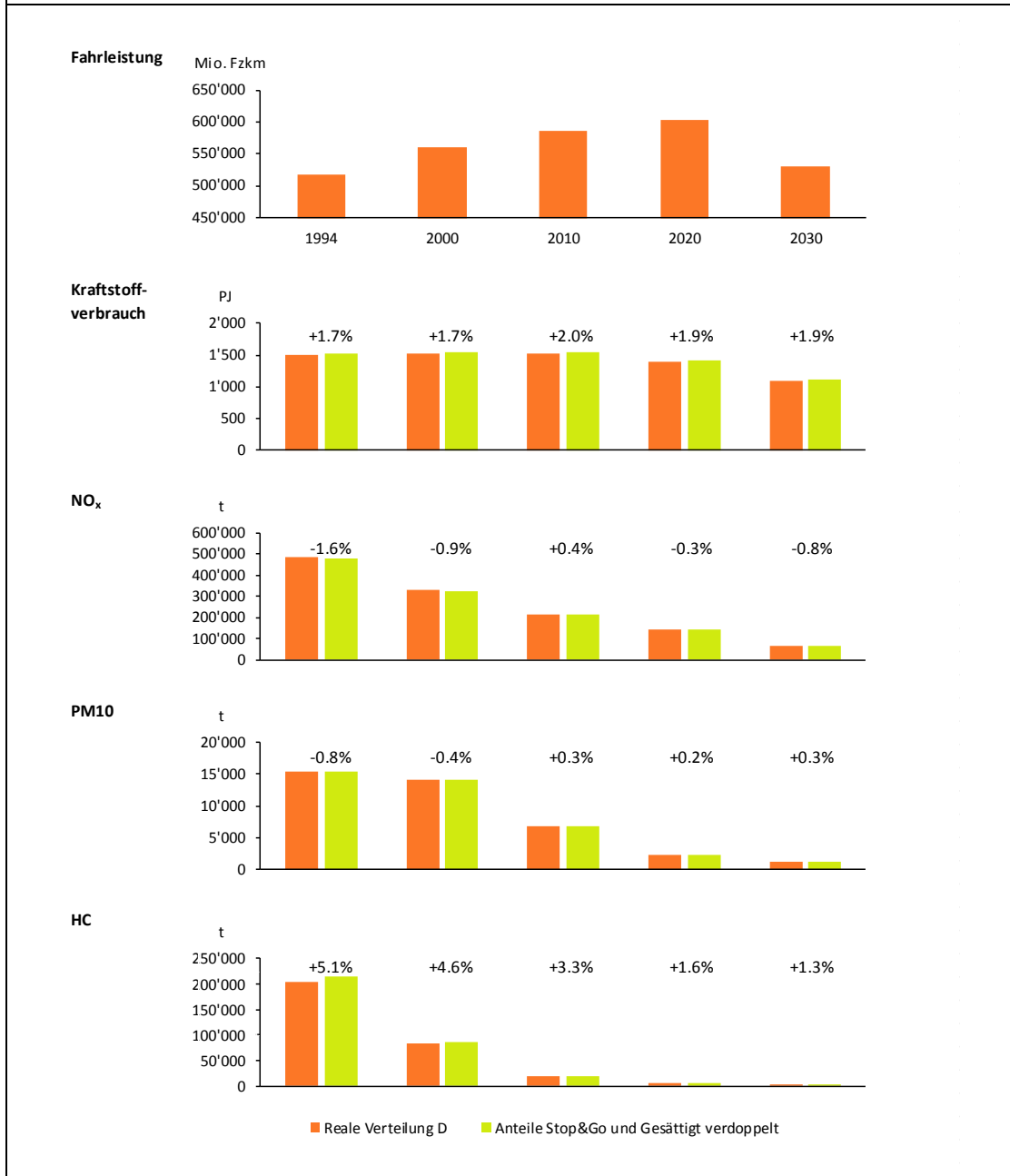
<b>Tabelle 34: Anteile der Levels of Service (LOS) in der Sensitivitätsanalyse.</b>				
<b>Jahr</b>	<b>Freeflow</b>	<b>Heavy</b>	<b>Saturated</b>	<b>Stop&amp;Go</b>
<b>Referenzfall</b>				
1994	64.3%	21.9%	12.9%	0.9%
2000	65.2%	21.3%	12.6%	0.9%
2010	61.8%	23.2%	14.0%	1.0%
2020	63.2%	22.2%	13.6%	1.0%
2030	63.4%	22.0%	13.6%	1.0%
<b>Sensitivitätsrechnung</b>				
1994	59.7%	12.8%	25.7%	1.8%
2000	60.5%	12.5%	25.2%	1.8%
2010	56.9%	13.1%	28.0%	2.0%
2020	58.1%	12.6%	27.3%	2.0%
2030	58.3%	12.6%	27.1%	2.0%

Die Wirkung dieser Verschiebung auf die Gesamtemissionen ist relativ gering (Abbildung 34): Der Kraftstoffverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen steigen um 1.7% bis 2.0%. Bei den Luftschadstoffen sind die Effekte bei den Kohlenwasserstoffen am größten, nehmen jedoch mit der Zeit ab (von 5.1% im Jahr 1990 auf 1.3% im Jahr 2030). Bei den Stickoxiden und Partikelemissionen bleibt die Veränderung gegenüber dem Referenzfall in fast allen Jahren unter 1%, ist aber zum Teil auch negativ. Für die Jahre 1990 und 2000, für welche die zur Anwendung kommenden Emissionsfaktoren mit weniger Messungen abgestützt sind, können zudem unbeabsichtigte Generalisierungseffekte hereinspielen – wie z.B. dass der gleiche Emissionsfaktor für den LOS „Stop&Go“ auf Autobahnabschnitten aller Geschwindigkeitslimiten angewendet wird, und für die Autobahnen mit Höchstgeschwindigkeit 80 km/h liegt der Freeflow-Emissionsfaktor höher.

Insgesamt zeigt die Sensitivitätsanalyse einen begrenzten Einfluss der Verteilung der Verkehrssituationen, zumindest bei den absolut gesehen geringen Verschiebungen der LOS, wie sie hier vorgenommen wurden, aber auch realistisch sein könnten. Dies liefert auf der einen Seite wenig Rechtfertigung für den komplexeren Verkehrssituationen-Ansatz auf national aggregierter Ebene; andererseits zeigt sich, dass sich der mögliche Fehler, der sich durch die unsichere Zuordnung der Levels of Service ergibt, in engen Grenzen hält.

Auf lokaler Ebene kann der Einfluss der Verkehrssituationen hingegen durchaus relevant sein; aus der Herleitung der Verkehrssituationen resultieren zudem auch von anderen Nutzern verwendete Datensätze, wie Fahrleistungen und Emissionsfaktoren nach Verkehrssituation oder Durchschnittsgeschwindigkeiten (welche z.B. in diesem Projekt auch für die Berechnungen mit COPERT genutzt wurden).

**Abbildung 34: Fahrleistungen und Emissionen mit TREMOD unter der Verwendung der originalen LOS-An-teile in Deutschland sowie mit Verdopplung der Anteile Stop&Go und Gesättigt.**



Eigene Darstellung; Daten: IFEU

## 7.4. Fazit der Vergleichsrechnungen

Die Vergleichsrechnungen zeigen, dass sich die Modellresultate von COPERT und TREMOD deutlicher unterscheiden, als aufgrund der gleichen Datengrundlagen zu erwarten war. Bei Verwendung der originalen Inputdaten bewegen sich die Abweichungen (COPERT-Wert/TREMOD-Wert – 100%) des gesamten Verbrauchs pro Jahr bei +/-5%, und die Abweichungen der gesamten Emissionen pro Schadstoff und Jahr bei -1% bis 45% (also höhere Emissionen bei COPERT trotz gesamthaft tieferer Fahrleistungen). Bei Verwendung der gleichen Inputdaten (derjenigen von TREMOD) liegen die Abweichungen des Verbrauchs pro Jahr bei -2% bis +14% und die Abweichungen der Emissionen bei -4% bis 25%. Dazu ist anzumerken, dass sich die Abweichungen in beiden Vergleichsrechnungen nicht direkt miteinander vergleichen lassen, da in der zweiten Vergleichsrechnung andere Jahre modelliert wurden und die Busse und Krafträder nicht berücksichtigt sind. Zudem sollte beachtet werden, dass sich bei COPERT bei der Verwendung anderer Inputdaten nicht nur Fahrleistungen und Flottenzusammensetzung, sondern auch die Durchschnittsgeschwindigkeit und damit die Emissionsfaktoren ändern, und dass den SNF in den originalen COPERT-Aktivitätsdaten höhere Fahrleistungen zugeordnet und sich die Effekte bei dieser v.a. für NO<sub>x</sub> und PM10 relevanten Fahrzeugkategorie daher umkehren.

Bereits der Vergleich der Aktivitätsdaten (Kapitel 6.1.1) verdeutlicht, dass trotz gleicher statistischer Grundlagen die unterschiedlichen Methoden (z.B. Wahl des zu kalibrierenden Eingangsparameters) zu deutlich unterschiedlichen Verkehrsmengengerüsten führen können. Aber selbst wenn dieselben Aktivitätsdaten verwendet werden, so führen die unterschiedlichen Emissionsfaktoren zu unterschiedlichen Resultaten. Hierzu können folgende Beobachtungen festgehalten werden:

- TREMOD differenziert Fahrzeugschichten wie auch Straßenkategorien feiner bezogen auf die für Deutschland relevanten Fahrzeugschichten und enthält auch Emissionsfaktoren für die heute sich im Verkehr befindenden alternativen Antriebe, welche z.T. bei COPERT fehlen.
- Die Emissionen bzw. der Kraftstoffverbrauch von COPERT liegen bei Verwendung gleicher Inputdaten mehrheitlich höher, v.a. in der Periode 2010-2030. Die Absenkung der spezifischen Emissionen mit der Zeit bzw. mit fortschreitenden Emissionsstandards ist laut COPERT weniger ausgeprägt. Die Kohlenwasserstoffe bilden eine Ausnahme von dieser allgemeinen Feststellung.
- Die Effizienzverbesserung des Kraftstoffverbrauchs wird durch die Kraftstoffverbrauchsfaktoren von COPERT nicht nachvollzogen, obwohl das Modell dazu grundsätzlich in der Lage ist (vgl. Kapitel 4.5.4) – sie nehmen mit der Zeit nicht ab, sondern z.T. sogar zu. Bei den in der ersten Vergleichsrechnung verwendeten Inputdaten von COPERT wurden die Fahrleistungen so angepasst, dass in den Jahren 2000 und 2010 der modellierte Kraftstoffverbrauch mit



dem Absatz nach AG Energiebilanzen übereinstimmt; bei den in der zweiten Vergleichsrechnung verwendeten TREMOD-Inputdaten zeigt sich, dass COPERT ohne Anpassung der Fahrleistungen den Kraftstoffverbrauch 2010 überschätzt. Dies spricht für eine Absenkung des spezifischen Verbrauchs, wie sie in TREMOD umgesetzt ist.

Die durchgeführten Sensitivitätsrechnungen lassen die folgenden Schlussfolgerungen zu:

- Bei COPERT konnte eine systematische Abhängigkeit der Resultate vom Aggregationsniveau der Inputs festgestellt werden (s. dazu auch Smit et al. 2008). Je differenzierter die Fahrleistungsinputs, desto höher fallen die Emissionsresultate aus. Die resultierenden Unterschiede sind jedoch gering.
- Bei TREMOD sind die Resultate nicht allzu stark von der verwendeten Verkehrssituationen-Zusammensetzung abhängig. Dies liefert wenig Berechtigung für den komplexeren Verkehrssituationen-Ansatz, aber zeigt, dass der potentielle Fehler durch ungenaue Level of Service-Zuordnung gering ist. Diese Aussagen gelten natürlich für die nationale Skala - bei räumlich differenzierteren Modellierungen (z.B. mit HBEFA) können sich durchaus namhafte Verschiebungen der Levels of Service und damit der Emissionen ergeben.

## 8. Vergleich der Modelleignung

### 8.1. Übersicht

Tabelle 35 zeigt eine Übersicht der ausgewerteten Vergleichskriterien mit den jeweiligen Indikatoren und der Beurteilung der Modelleignung nach Anwendungsfall. Die Modelleignung wird relativ ausgedrückt und kann drei Werte annehmen:

- Entweder TREMOD ist aufgrund der Indikatorausprägung für einen bestimmten Anwendungsfall besser geeignet,
- COPERT ist besser geeignet,
- beide Modelle sind ähnlich gut geeignet (oder auch ungeeignet), oder es lässt sich aufgrund der verfügbaren Informationen kein Modell als besser geeignet bezeichnen.

In der Kriteriengruppe „Nutzen“ werden die meisten Indikatoren differenziert nach Anwendungsfall beurteilt. In den anderen beiden Kriteriengruppen ist eine Differenzierung nach Anwendungsfall z.T. nicht möglich und in den meisten Fällen auch nicht sinnvoll.

Die Begründungen für die einzelnen Beurteilungen sind in den folgenden Unterkapiteln detailliert beschrieben.

Tabelle 35: Übersicht der Vergleichskriterien, Indikatoren und relative Modelleignung nach Indikator und Anwendungsfall.							
Kriterien- gruppe	Kriterium	Indikator	Geeigneteres Modell nach Anwendungsfall				
			Treibhausgasinventare	Luftschadstoffinventare	Zukunftsszenarien	Verkehrsträgervergleich	Wirkungsabschätzungen
Nutzen	Genauigkeit der Resultate	Detaillierungsgrad (Emissionsfaktoren, Aktivitätsdaten)	=	=	T	T	T
		Unsicherheit Emissionsfaktoren	T				
		Berücksichtigung der Effizienz des Treibstoffverbrauchs	T	T	T	T	T
		Durchgeführte Validierungsstudien	C				
		Plausibilisierungshilfen in der Software	T				
	Anwendbarkeit	Detaillierungsgrad (räumlich, zeitlich)	=	=	=	=	=
		Für Zukunft anwendbares Flottenmodell	=	=	T	=	=
		Verfügbarkeit Emissionsfaktoren	=	C	T	=	=
		Berücksichtigung Vorkettenemissionen	=	=	T	T	T
		Berücksichtigung Auslastung	=	=	T	T	=
		Berücksichtigung anderer Verkehrsträger	=	=	=	T	=
		Bereits für Anwendungsfall verwendet	=	=	=	T	=
	Kosten	Modellkosten (inkl. EF)	Beschaffungs- oder Entwicklungskosten des Modells (inkl. Emissionsfaktoren)	=			
Kosten der Aktivitätsdaten		Zeitaufwand zur Aufbereitung von Aktivitätsdaten	C				
Aufwand für Modellanwendung		Zeitaufwand für einen Modellrun	=				
		Knowhow-Anforderungen an Benutzer	=				
Weitere	Zukunftsfähigkeit	Institutionelle Verankerung	=				
		Langfristige Finanzierung	=				
		Nachhaltigkeit der Software-Plattform	C				
		Anzahl Benutzer	C				
	Kommunikation	Verfügbare Publikationen	C				

C	COPERT aufgrund Indikator für Anwendungsfall geeigneter
T	TREMODO aufgrund Indikator für Anwendungsfall geeigneter
=	Beide Modelle gleich oder ähnlich gut geeignet

## 8.2. Nutzen-Kriterien

### 8.2.1. Genauigkeit der Resultate

Beim Kriterium „Genauigkeit der Resultate“ besteht die Schwierigkeit, dass die „wahren“ Emissionen eines Landes nicht gemessen werden können und für die Zielgröße daher kein direkter unabhängiger Vergleichswert besteht. Nur der modellierte Kraftstoffverbrauch kann einer empirischen (statistischen) Größe gegenübergestellt werden, aber auch hier gelten Einschränkungen. Dies führt dazu, dass aufgrund der in den folgenden Abschnitten beschriebenen Indikatoren indirekte Schlüsse zur Genauigkeit der Resultate hergeleitet werden müssen.

#### **Detaillierungsgrad von Emissionsfaktoren und Aktivitätsdaten**

Der Detaillierungsgrad von Emissionsfaktoren und Aktivitätsdaten ist in TREMOD höher als in COPERT. Fahrzeugschichten werden hinsichtlich Abgasnachbehandlungstechnologie (EGR, SCR, Partikelfilter) stärker differenziert. Batterieelektrische Antriebe (BEV) und Plug-In-Hybride (PHEV) werden berücksichtigt, alternative Antriebe wie CNG, LPG und Hybride werden auch bei LNF und SNF (in Szenarien) unterschieden. Die aktuelle Version von COPERT beinhaltet BEV und PHEV nicht, und andere alternative Antriebe nur bei den PKW. Einige der zusätzlichen Differenzierungen in TREMOD wurden explizit auf Wunsch der Auftraggeber eingeführt, um den Effekt von Fördermaßnahmen für Technologien abzuschätzen. Auch hinsichtlich Straßenkategorien differenziert TREMOD bei Außerorts-Straßen und Autobahnen stärker, und berücksichtigt auf jeder Straßenkategorie die Verteilung der Verkehrssituationen (definiert durch funktionalen Straßentyp, Höchstgeschwindigkeit und Level of Service). Zudem werden Biokraftstoffe berücksichtigt, was in COPERT nicht der Fall ist.

Für Zukunftsszenarien, Verkehrsträgervergleiche und Wirkungsabschätzungen ist der zusätzliche Detaillierungsgrad von TREMOD relevant, etwa aufgrund der voraussichtlichen weiteren Verbreitung alternativer Antriebe in Zukunft, oder wenn die Wirkung von Massnahmen zur Förderung bestimmter neuer Technologien evaluiert werden soll. Daher wird TREMOD für diese Anwendungsfälle aufgrund des zusätzlichen Detaillierungsgrades als geeigneter beurteilt.

Für das Reporting zuhanden der internationalen Konventionen zu Klima und Luftreinhaltung ist der zusätzliche Detaillierungsgrad hingegen von untergeordneter Bedeutung, und beide Modelle werden als ähnlich geeignet beurteilt.

### Unsicherheit der Emissionsfaktoren

Zwar liegen Studien zur Unsicherheit von Emissionsberechnungen mit COPERT und TREMOD vor (IFEU and INFRAS 2010, EMEP/EEA 2014), sie sind aber aufgrund der unterschiedlichen Methoden und der unterschiedlichen betrachteten Länder nicht direkt vergleichbar<sup>13</sup>, für TREMOD beziehen sie sich zudem auf eine ältere Version der Emissionsfaktoren aus HBEFA 3.1 (die aktuelle Version ist 3.2, die Unterschiede sind jedoch nicht groß). Für NO<sub>x</sub> liegt gemäss diesen Studien die Unsicherheit bei COPERT höher (41% ggü. 26% bei TREMOD, als 95%-Vertrauensintervall ausgedrückt). Für HC ist die Unsicherheit beider Modelle vergleichbar (44% bei TREMOD ggü. 43% bei COPERT). Die anderen hier betrachteten Schadstoffe sind nicht Teil von mindestens einer der Studien, oder die Beurteilung der Unsicherheit folgt grundsätzlich anderen Kriterien<sup>14</sup>.

Theoretisch müsste die Unsicherheit bei COPERT grösser sein, da ein zusätzlicher Herleitungsschritt – das Anpassen der Funktionen der Emissionsfaktoren in Abhängigkeit der Geschwindigkeit – notwendig ist, welcher zusätzliche Unsicherheit einführt. Auf der anderen Seite müssen bei TREMOD, welches die Emissionsfaktoren nach Verkehrssituationen differenziert, die Aktivitätsdaten ebenfalls nach diesen Verkehrssituationen differenziert vorliegen; diese Differenzierung ist ebenfalls unsicher. Bei COPERT kommt schliesslich eine zusätzliche Unsicherheit dadurch hinzu, dass durch Aggregation der Durchschnittsgeschwindigkeit nicht die gleichen durchschnittlichen Emissionsfaktoren resultieren wie bei stärker differenzierten Inputs (s. Kapitel 7.3.1, vgl. auch Smit et al. 2008). Die dadurch entstehenden Abweichungen (bis 9% der gesamten PKW-Emissionen im Beispiel) sind größer als die Abweichungen, welche z.B. durch eine Unterschätzung der Stau- und gesättigten Verkehrssituationen um das Doppelte in TREMOD entstehen können, wie die Sensitivitätsanalyse zeigt (bis rund 2% der gesamten PKW-Emissionen, vgl. Kapitel 7.3.2). Die gerechneten Sensitivitäten stellen dabei nicht die möglichen Extreme, sondern einigermaßen realistische Variationen dar.

Bei den Verdampfungs-Emissionsfaktoren ist die Unsicherheit bei TREMOD höher einzustufen, da das letzte Update der Verdampfungs-Emissionsfaktoren von COPERT in HBEFA und TREMOD (Mellios et al. 2012) noch nicht umgesetzt worden ist (die Methodik der Verdampfungsemission in HBEFA und TREMOD beruht auf COPERT, s. Kapitel 5.5.5). Die Verdampfungsemissionen sind aber nur bei den Kohlenwasserstoffen relevant.

Insgesamt wird daher anwendungsfallunabhängig dem Modell TREMOD eine leicht höhere Eignung aufgrund der geringeren Unsicherheit der Emissionsfaktoren attestiert.

<sup>13</sup> Wegen der unterschiedlichen Flottenzusammensetzungen und der unterschiedlichen Relevanz der Emissionsarten werden in verschiedenen Ländern die Unsicherheiten der einflussenden Basis-Emissionsfaktoren anders gewichtet.

<sup>14</sup> Die Studie von IFEU und INFRAS (2010) bezieht sich auf die UNFCCC-Inventare und betrachtet daher den Verbrauch als Teil der Aktivitätsdaten, da er von statistischen Quellen stammt. Die Unsicherheit beim CO<sub>2</sub> beschränkt sich daher auf den kraftstoffbasierten CO<sub>2</sub>-Umrechnungsfaktor, womit dieser viel tiefer liegt als in EMEP/EEA (2014).

### **Berücksichtigung der Effizienz des Treibstoffverbrauchs**

Bei TREMOD werden Effizienzverbesserungen bei den PKW wie in HBEFA mithilfe einer Basiskorrektur und einer Jahreskorrektur berücksichtigt (vgl. Kapitel 5.5.4). Die Basiskorrektur sorgt für die Anpassung des an einzelnen Fahrzeugen gemessenen Verbrauchs an die Größenklassenverteilung der PKW-Flotte Deutschlands; die Jahreskorrektur berücksichtigt die Effizienzverbesserung anhand der gewichteten mittleren CO<sub>2</sub>-Emissionen der PKW aus dem Monitoring, d.h. den Typenprüfwerten der Neuzulassungen; aufgrund der aus verschiedenen Untersuchungen (z.B. ICCT 2013) dokumentierten Abweichungen zwischen Norm- und Realverbrauch, wird aber nur ein bestimmter Anteil (für 2008-2013 sind es 50%) der jährlichen Effizienzsteigerung für die Modellierung übernommen. Die gute Übereinstimmung des so modellierten Kraftstoffverbrauchs mit dem Absatz gemäß Statistik (IFEU 2012) deutet, bei allen Unsicherheiten, darauf hin, dass diese Methode zuverlässige Resultate liefert.

Bei COPERT können Effizienzverbesserungen ebenfalls berücksichtigt werden: Einerseits über niedrigere Verbrauchsfaktoren für neuere Emissionsstandards, andererseits innerhalb der Emissionsstandards mittels der sogenannten CO<sub>2</sub>-Korrektur, welche wie in TREMOD/HBEFA sowohl die Größenklassenverteilung der Flotte eines Landes als auch die zeitliche Entwicklung berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.5.4). In den Vergleichsrechnungen für diesen Bericht werden aber trotzdem zum Teil sogar zunehmende Verbrauchsfaktoren mit fortschreitenden Emissionsstandards festgestellt (s. Kapitel 6.2.2). Die CO<sub>2</sub>-Korrektur sorgt im zeitlichen Verlauf nur bei den PKW mit Hubraum unter 2l für eine leichte Effizienzsteigerung, für größere PKW aber für eine Verschlechterung (also steigende Verbrauchsfaktoren mit Baujahr innerhalb der gleichen Euro-Stufe). Somit resultiert für alle PKW gemäß COPERT im Durchschnitt ein Anstieg des spezifischen Energieverbrauchs um 10%. Bei TREMOD sinkt der spezifische Energieverbrauch in der gleichen Zeitspanne um 9% (vgl. Kap. 7.2.2). Dies ist auf die unterschiedliche Methodik der Berücksichtigung der Kraftstoffeffizienz zurückzuführen, welche bei COPERT die Zunahme des durchschnittlichen Fahrzeuggewichts stärker gewichtet. Für Deutschland erscheint angesichts der besseren Übereinstimmung mit der Kraftstoffbilanz und den Fahrleistungen die Methodik von TREMOD plausibler<sup>15</sup>.

Daher wird TREMOD für die Anwendungsfälle Zukunftsszenarien, Verkehrsträgervergleich und Wirkungsabschätzungen aufgrund der berücksichtigten Veränderung des spezifischen

---

<sup>15</sup> Es kann auch argumentiert werden, dass die Fahrleistungen unsicher und demnach anzupassen sind, so wie es bei COPERT getan wird (vgl. Kapitel 6.1.1). Angesichts der Tatsache, dass die Fahrleistungen in Deutschland durch verschiedene Statistiken und Erhebungen abgestützt sind (s. Kapitel 5.6.2), wird jedoch hier die Abnahme des spezifischen Verbrauchs als plausibler erachtet. Die in TREMOD umgesetzte Annahme, dass in Deutschland zwischen 2001 und 2010 ungefähr die Hälfte der Abnahme des spezifischen Verbrauchs gemäß Typenprüfungen real ist, wird auch von Mock et al. (2013) gestützt.

Kraftstoffverbrauchs als klar geeigneter als COPERT eingestuft. Für die Treibhausgas- und Luftschadstoffinventare hatte der modellierte Kraftstoffverbrauch während der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls (bis 2012) wenig Relevanz, da er dort (wie auch die direkt davon abhängigen Schadstoffe) nur nach Kraftstoffart differenziert aufgrund des statistischen Absatzes berechnet wurde. Ab der zweiten Verpflichtungsperiode werden jedoch die nach Fahrzeugkategorien aufgeschlüsselten Emissionen verlangt, womit die Berücksichtigung der Effizienzverbesserungen bei den PKW auch für die Inventare an Relevanz gewinnt. TREMOD ist daher auch für die Inventare als geeigneter zu bezeichnen.

### **Durchgeführte Validierungsstudien**

Validierungsstudien, welche die modellierten Emissionen mit unabhängigen gemessenen Daten vergleichen (beispielsweise für Straßenabschnitte oder Tunnels), können Hinweise auf die Genauigkeit der Ergebnisse der untersuchten Modelle geben.

Für COPERT existiert eine Reihe solcher Validierungsstudien (z.B. Joumard et al. 2003, Ekström et al. 2004, Pujadas et al. 2004, Murena and Favale 2007, Smit et al. 2010, Kousoulidou et al. 2010). In diesen wurden die modellierten Emissionen oder Emissionsfaktoren mit Werten aus Luftschadstoffkonzentrationsmessungen, Remote Sensing, PEMS-Messungen und Labormessungen verglichen. Darin wurden für die hier betrachteten Schadstoffe Abweichungen der modellierten von den gemessenen Werten um Faktoren 0-3, z.T. bis Faktor 5 festgestellt, wobei aber die meisten Abweichungen unter 100%, ein großer Teil sogar unter 50% lagen. Bei CO<sub>2</sub>, HC und NO<sub>x</sub> sind die Abweichungen generell geringer als beim PM<sub>10</sub>.

Für TREMOD wurden Validierungen auf der Ebene der Aktivitätsdaten und des Kraftstoffverbrauchs durchgeführt (IFEU 2014), und die Emissions- und Verbrauchsfaktoren werden indirekt validiert durch ihre Veröffentlichung in Webapplikationen wie EcoTransIT oder EcoPassenger. Validierungsstudien mit Vergleichen mit unabhängigen Messungen der Luftschadstoffe sind nicht bekannt. Für HBEFA, das Modell, aus dem TREMOD die meisten Emissionsfaktoren bezieht (s. Kapitel 3.2.1, 5.5.5), sind wiederum Validierungsstudien vorhanden, wenn auch deutlich weniger an der Zahl als für COPERT (z.B. Hausberger et al. 2003, Colberg et al. 2005, Smit et al. 2010). Diese nennen Abweichungen zu gemessenen Werten in ähnlichen Größenordnungen wie diejenigen von COPERT.

Damit lässt sich aus den in den Validierungsstudien festgestellten Abweichungen nicht herleiten, welches Modell die besseren Schätzungen liefert. Die Aussagekraft der Validierungsstudien ist auch deswegen begrenzt, weil sie sich allesamt auf ältere Versionen der Modelle beziehen – mittlerweile sind die Verbrauchsfaktoren neuer Emissionsstandards hinzugekommen und/oder relevanter geworden.

Schließlich stellt aber allein die Tatsache, dass COPERT einer Vielzahl von Forschern zugänglich ist und Validierungsstudien durchgeführt wurden, einen gewissen Vorteil hinsichtlich der Identifizierung von Problemen und Schwachstellen dar: Durch die kritische Prüfung durch unabhängige Wissenschaftler ist die Wahrscheinlichkeit größer, dass Verbesserungen herbeigeführt werden.

### Plausibilisierungshilfen in der Software

TREMODO bietet mehrere automatisierte Abfragen, welche Benutzer bei der Plausibilisierung der Inputs und der Resultate unterstützen. Bei COPERT kann „nur“ der modellierte Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch mit dem Absatz gemäß Energiestatistik verglichen werden (Tabelle 36). Daher hat TREMOD hinsichtlich der Ergebnisgenauigkeit eine höhere Eignung für alle Anwendungsfälle, da durch die Plausibilisierung die Fehlerwahrscheinlichkeit minimiert wird.

<b>Tabelle 36: Plausibilisierungshilfen in der Modellsoftware von COPERT und TREMOD.</b>		
<b>Berechnungsgröße</b>	<b>COPERT</b>	<b>TREMODO</b>
Input-Fahrleistung	n/a	Abfrage Input- vs. Output-Fahrleistung
Input-Verkehrsleistung	(nicht COPERT-Input)	Abfrage Input- vs. Output-Verkehrsleistung
Energiebilanz	Vergleich modellierter Energieverbrauch mit Statistik	
Emissionen/Emissions-faktoren	n/a	Abfrage Gesamtergebnisse und implizierte Emissionsfaktoren und Gegenüberstellung mit HBEFA

Quellen: IFEU, EMISIA

## 8.2.2. Anwendbarkeit

### Räumlicher/zeitlicher Detaillierungsgrad

TREMODO ist im Bereich Straßenverkehr auf die nationale Ebene (Deutschlands) ausgerichtet, kann aber auch für Teilbereiche (z.B. Länder oder Städte) angewendet werden (Kapitel 5.4.5). COPERT ist für nationale und subnationale räumliche Skalen konzipiert (bis Stadt-Ebene, s. Kapitel 4.4.5 und Modell-Website). Bei beiden Modellen können jedoch weder Inputs noch Outputs innerhalb des betrachteten Gebiets räumlich weiter differenziert werden als nach Straßentypen. In Deutschland wird daher für lokale Anwendungen öfter HBEFA als TREMOD eingesetzt, welches die Differenzierung nach Straßenabschnitt erlaubt.

Die zeitliche Auflösung beträgt bei beiden Modellen ein Jahr (Kapitel 4.4.6, 5.4.6).

Der räumliche und zeitliche Detaillierungsgrad führt zu keiner besseren Eignung eines der beiden Modelle für einen bestimmten Anwendungsfall.



### **Für die Zukunft anwendbares Flottenmodell**

Ein für die Zukunft anwendbares Flottenmodell ist Teil von TREMOD. COPERT enthält dies nicht. Für Flottenvorhersagen kann SIBYL verwendet werden, welches in COPERT verwendbare Outputs liefert (s. Kapitel 4.6). Dieses Modell ist aber nicht explizit Teil des in dieser Studie angestellten Vergleichs und ist mit Zusatzkosten (Lizenz) verbunden. Zudem zeigt der Vergleich der prognostizierten Flottendaten von SIBYL mit denjenigen von TREMOD in Kapitel 6.1.2, dass SIBYL auch bei gleichen Eingangsdaten (Neuzulassungen, Überlebenswahrscheinlichkeiten) nicht dieselben Flottenzusammensetzungen wie TREMOD prognostizierte.

Für den Anwendungsfall der Zukunftsszenarien ist daher TREMOD besser geeignet.

### **Verfügbarkeit von Emissionsfaktoren**

Hier ist sowohl die Verfügbarkeit von Emissionsfaktoren für alle relevanten Fahrzeugschichten als auch für alle relevanten Schadstoffe von Bedeutung.

Beim ersten Kriterium schneidet TREMOD besser ab, da wie bereits erwähnt Emissionsfaktoren für alle bisher und in absehbarer Zukunft eingesetzten Technologien vorhanden sind. Dagegen fehlen in COPERT verschiedene Fahrzeugschichten, welche gegenwärtig zwar nur einen kleinen Fahrleistungsanteil ausmachen, aber zukünftig relevant werden können.

COPERT enthält hingegen Emissionsfaktoren für eine größere Schadstoffpalette als TREMOD, namentlich Partikelemissionen aus Abrieb und Aufwirbelung, mehr Kohlenwasserstoffe sowie Schwermetalle. Letztere fehlen in TREMOD und HBEFA, dafür werden Russ und Black Carbon ausgewiesen (vgl. Kapitel 4.4.3, 5.4.3).

Durch die bessere Verfügbarkeit von Emissionsfaktoren für zukünftig relevante Fahrzeugschichten ist TREMOD wiederum für Zukunftsszenarien besser geeignet. Für die Berichterstattung zuhanden der Konvention über grenzüberschreitende Luftverunreinigungen (also den Informative Inventory Report IIR) ist hingegen COPERT besser geeignet, da das Modell die dafür relevante Luftschadstoffpalette vollständig abdeckt. Beim Verkehrsträgervergleich spricht aus Sicht der Verfügbarkeit von Emissionsfaktoren für TREMOD, dass es elektrische Antriebe auf der Straße berücksichtigt, welche für Verkehrsträgervergleiche eine entscheidende Rolle spielen. Für COPERT spricht hingegen, dass Partikelemissionen aus Abrieb und Aufwirbelung modelliert werden – diese stellen beim Schienenverkehr eine relevante Größe dar. Zwar kann mit COPERT nur der Straßenverkehr modelliert werden, COPERT könnte aber zusammen mit anderen Modellen für den Vergleich eingesetzt werden. Daher lässt sich keine bessere Eignung eines der beiden Modelle – COPERT oder TREMOD – aufgrund der Verfügbarkeit von Emissionsfaktoren für den Anwendungsfall Verkehrsträgervergleich ermitteln.

### **Berücksichtigung von Vorkettenemissionen, Auslastung und anderen Verkehrsträgern**

Diese drei Elemente werden nur von TREMOD berücksichtigt, bei COPERT sind sie aufgrund anderer Systemgrenzen irrelevant.

Die Berücksichtigung der Vorkettenemissionen resultiert in einer besseren Eignung von TREMOD für Zukunftsszenarien (zunehmende Relevanz elektrischer Antriebe und damit der Emissionen der Stromproduktion), Verkehrsträgervergleiche (beim elektrifizierten Schienenverkehr sind die Vorkettenemissionen die hauptsächliche Umweltwirkung) oder Wirkungsabschätzungen (z.B. Evaluation der Förderung elektrischer Fahrzeuge mit entsprechenden Vorkettenemissionen).

Durch die Berücksichtigung der Auslastung bringt TREMOD bessere Voraussetzungen mit für Zukunftsszenarien (prognostizierte Verkehrsnachfrage in Personen- oder Tonnenkilometern muss mit Hilfe der Auslastung in Fahrleistung umgerechnet werden) wie auch bei Verkehrsträgervergleichen (wegen unterschiedlicher Kapazität der Fahrzeuge nicht in Fahrzeugkilometern sinnvoll).

Da in TREMOD unterschiedliche Verkehrsträger integriert sind, können mit TREMOD methodisch konsistente Vergleiche angestellt werden; COPERT bietet diese Möglichkeit nicht.

### **Bereits für Anwendungsfall verwendet**

TREMOD wird in Deutschland, COPERT in 22 anderen europäischen Ländern plus einigen Ländern in Asien, Südamerika und Ozeanien für die nationale Berichterstattung zuhanden der Klimakonvention und der Konvention über grenzüberschreitende Luftverunreinigungen eingesetzt (Kapitel 4.4.7, 5.3.2).

Beide Modelle wurden auch bereits in mehreren Studien für Zukunftsszenarien eingesetzt (Burón et al. 2005, Kousoulidou et al. 2008, Leinert et al. 2009, Amann et al. 2010, BMVBS 2013, Öko-Institut 2013, DLR et al. 2014a, DLR et al. 2014b, Fraunhofer IWES et al. 2015). Die zukünftigen Flottenzusammensetzungen mussten bei COPERT allerdings jeweils manuell oder mit Hilfe anderer Modelle (z.B. SIBYL) berechnet werden.

Nur TREMOD wurde bisher für Verkehrsträgervergleiche eingesetzt (z.B. Öko-Institut 2013, IFEU 2014, UBA 2014b), von COPERT ist keine derartige Anwendung bekannt.

Für Wirkungsabschätzungen wurden wiederum beide Modelle wiederholt angewendet (Jansen and Denis 1999, Parra et al. 2006, IER 2014, Öko-Institut et al. 2014, Coelho et al. 2014), TREMOD allerdings nur auf nationaler Ebene.

Aus diesem Grund lässt die bereits erfolgte Verwendung nur für den Anwendungsfall Verkehrsträgervergleich auf eine bessere Eignung von TREMOD schließen. Für die anderen Anwendungsfälle sind beide Modelle aufgrund dieses Indikators ähnlich oder gleich gut geeignet.

### 8.3. Kosten-Kriterien

Bei den Kosten-Kriterien ist, im Gegensatz zu den Nutzen-Kriterien, eine differenzierte Betrachtung nach Anwendungsfall nicht möglich und/oder nicht sinnvoll (wie auch bei den weiteren Kriterien, s. Kapitel 8.4). Bei den bereits angefallenen Entwicklungskosten beispielsweise ist es nicht sinnvoll, aus dem Vergleich eine bessere Eignung für einen bestimmten Anwendungsfall herzuleiten. Die Aktivitätsdaten unterscheiden sich zwar je nach Anwendungsfall, grundsätzlich basieren aber für praktisch alle Anwendungen (auch auf lokaler Ebene) viele Parameter (Flottenzusammensetzung, spezifische Fahrleistungen etc.) auf nationalen Aktivitätsdaten. Und der Aufwand für eine Modellanwendung (Modell-Lauf plus Standardauswertungen) unterscheidet sich bei einem Modell kaum nach Anwendungsfall.

#### 8.3.1. Modellkosten

Die Modell-Entwicklungskosten setzen sich zusammen aus dem Aufwand für die Entwicklung der Methodik, die Herleitung der Emissionsfaktoren sowie der Umsetzung in der Modellsoftware. Sie sind nur schwer quantitativ beurteilbar, da die Modellentwicklung meist über verschiedene Projektbudgets, verteilt über unterschiedliche Jahre, finanziert ist und der tatsächliche Anteil der Modellentwicklung innerhalb dieser Projekte kaum erhoben wird. Dazu kommt die Vernetzung zwischen Modellen – zum Beispiel finanzieren die deutschen Forschungsgelder auch die Entwicklung der Emissionsfaktoren von HBEFA, von denen dann wiederum COPERT und TREMOD profitieren. Dies macht die Abgrenzung schwierig.

Trotz diesen Einschränkungen lässt sich die Aussage machen, dass sich die Entwicklungskosten beider Modellen in ähnlichen Größenordnungen bewegen dürften – in den letzten fünf Jahren gemäß den Entwicklern im Bereich von 30.000-40.000 Euro jährlich. Bei TREMOD bezieht sich diese Angabe auf den Teil Straßenverkehr des Modells und ist somit vergleichbar mit den Kosten von COPERT.

#### 8.3.2. Kosten der Aktivitätsdaten

Der Aufwand für die Aufarbeitung von Aktivitätsdaten eines Jahres für Deutschland ist bei COPERT deutlich geringer als bei TREMOD: Während ein erfahrener Benutzer, welcher dies jährlich tut, gemäß den Entwicklern etwa 1-2 Tage benötigt, um den COPERT-Aktivitätsdatensatz aus den Quellstatistiken aufzubereiten, braucht ein unerfahrener Benutzer schätzungsweise 5 Tage. Bei TREMOD dauert die Aufbereitung hingegen rund 20 Tage.

Der höhere Aufwand bei TREMOD ist einerseits im höheren Detaillierungsgrad der TREMOD-Aktivitätsdaten begründet (s. Kapitel 6.1.1): Mehr Fahrzeugschichten, Herleitung der Verteilung der Verkehrssituationen, etc. Zweitens werden mehr statistische Grundlagen (Bestand,

Fahrleistungserhebungen, Verkehrszählungen, Energiestatistiken etc.) herangezogen und miteinander verglichen, um einen konsistenten und plausiblen Datensatz herzuleiten. Und schließlich ist der Aufwand für TREMOD auch deswegen höher, als der tatsächlich benötigte Input es verlangt, weil z.B. UBA und BASt zusätzliche Anforderungen für Dokumentationszwecke und interne Informationen stellen. Der Anteil dieses Zusatzaufwandes ist nicht direkt abschätzbar; es ist aber schon rein aufgrund des höheren Detaillierungsgrades von TREMOD nachvollziehbar, dass der Aufwand für die Aufbereitung der Inputs höher ausfällt.

### 8.3.3. Aufwand für Modellanwendung

#### **Zeitaufwand für einen Modellrun**

Der Zeitaufwand für einen Modellauf ist bei beiden Modellen ähnlich – er beträgt ca. einen Arbeitstag, inklusive der Erstellung der Standardauswertungen.

#### **Knowhow-Anforderungen**

Bei beiden Modellen ist die Erfahrung mit Straßenverkehrsemissionsmodellen ausschlaggebend für eine effiziente und korrekte Interpretation der Ergebnisse. Bei beiden Modellen gibt es Bereiche (Eingabeformulare, Funktionen), welche selbsterklärend sind und auch bei unerfahrenen Benutzern kaum Fehler zulassen, und andere, welche nur von erfahrenen Benutzern korrekt bedient werden können. Insofern unterscheiden sich die Knowhow-Anforderungen der beiden Modelle nicht signifikant.

## 8.4. Weitere Kriterien

### 8.4.1. Zukunftsfähigkeit

#### **Institutionelle Verankerung**

Beide Modelle sind institutionell gut verankert. TREMOD wird in Deutschland von verschiedenen Behörden (Umweltbundesamt, Bundesanstalt für Straßenwesen, Kraftfahrt-Bundesamt), halbstaatlichen Unternehmen (Deutsche Bahn) sowie Privaten (Verband der Automobilindustrie e.V.) mitgetragen (s. auch Kapitel 5.1.2). COPERT ist hauptsächlich in Institutionen auf der EU-Ebene (Europäische Umweltagentur, Europäische Kommission, Joint Research Centre) eingebettet. Für beide Modelle besteht ein Link über die internationale ERMES-Gruppe, welche u.a. von den COPERT- und HBEFA-Entwicklern sowie dem Joint Research Centre koordiniert wird.

Beide Modelle sind auch in den Workflow eingebettet, bei dem die Entwickler von HBEFA (wiederum institutionell verankert bei den Umweltämtern der an INFRAS beteiligten Länder, s. Kapitel 3.2.1) die Herleitung von Emissionsfaktoren in Zusammenarbeit mit den Entwicklern

des PHEM-Modells umsetzen. Von der (mehr oder weniger direkten) Übernahme der Emissionsfaktoren aus HBEFA sind sowohl TREMOD wie auch COPERT abhängig (sowie TREMOD/HBEFA von COPERT im Fall der Verdampfungs-Emissionsfaktoren). Umgekehrt fließen die von ifeu für TREMOD aufbereiteten Aktivitätsdaten für Deutschland in HBEFA ein, welches wiederum in Deutschland von zahlreichen Nutzern v.a. auf lokaler Ebene angewendet wird.

Die Grundlagen für den langfristigen Unterhalt und die Weiterentwicklung sind daher bei beiden Modellen in einem ähnlichen Ausmaß gegeben.

### **Langfristige Finanzierung**

Ähnlich verhält es sich mit der langfristigen Finanzierung. TREMOD hat zwar keine Grundfinanzierung – die Finanzierung erfolgt projektgebunden – die Kontinuität ist jedoch durch die Unterstützung der obengenannten Institutionen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit gesichert. Die längerfristige Finanzierung durch COPERT ist über fortlaufende Budgets im Rahmen des European Topic Centre for Air Pollution and Climate Change Mitigation (ETC/ACM) gesichert.

Die Finanzierung der beiden Modelle ist somit längerfristig ähnlich gut abgesichert – der durch den Projektcharakter etwas weniger verbindlichen Langfristigkeit bei TREMOD steht die breitere Diversifizierung der Auftraggeber gegenüber.

### **Nachhaltigkeit der Software-Plattform**

Die Modellsoftware ist technisch abhängig von der Software-Plattform, auf der sie aufbaut. Fällt die Plattform weg, wird sie großen Änderungen unterzogen oder verliert sie an Bedeutung, kann ein Plattform-Wechsel notwendig werden, welcher mit hohen Kosten verbunden sein kann.

Sowohl COPERT wie auch TREMOD bauen zu einem großen Teil auf Microsoft Access, der Datenbankapplikation der Microsoft Office-Suite, auf. TREMOD basiert vollständig auf Microsoft Access, d.h. eine Installation dieser Applikation (zumindest der Runtime-Version) ist notwendig für das Ausführen der Modellsoftware. COPERT verwendet Datenfiles im Microsoft Access-Format, die Software und ihre Funktionalität sind aber .NET-basiert. .NET ist eine ebenfalls von Microsoft herausgegebene Software-Plattform, welche aber unterschiedliche Programmiersprachen und Entwicklungsumgebungen unterstützt.

Sowohl Access wie auch .NET haben eine weltweit sehr breite Benutzerbasis und mit Microsoft eine große Entwicklerfirma, was Kontinuität und langfristigen Support sicherstellt. Bei einer reinen Access-Applikation wie TREMOD ist aber die direkte Abhängigkeit von Access etwas höher; jede neue Access-Version erfordert zwingend Anpassungen. COPERT könnte mit sehr viel weniger Aufwand das Format des Datenfiles ändern; überdies ist .NET teilweise sogar

quelloffen und läuft mit Mono<sup>16</sup> auch auf anderen Betriebssystemen wie Linux und OSX (allerdings mit Einschränkungen; COPERT wurde für dieses Forschungsvorhaben auf keinem anderen Betriebssystem getestet). COPERT wird aufgrund der Nachhaltigkeit der Software-Plattform daher eine leicht höhere Zukunftsfähigkeit attestiert.

### **Anzahl Benutzer**

COPERT hat aufgrund seiner öffentlichen Zugänglichkeit und seiner flexibleren Ausrichtung in geographischer Hinsicht eine breitere Benutzerbasis, mit über zwanzig EU- und Nicht-EU-Ländern, Universitäten und privaten Benutzern (s. Kapitel 4.3). TREMOD ist hingegen nicht öffentlich zugänglich und der Benutzerkreis der Applikation an sich beschränkt sich somit auf seine Entwickler und deren Auftraggeber (s. Kapitel 5.3). Die TREMOD-Ergebnisse werden jedoch ebenfalls von einem breiten Nutzerkreis von Institutionen und Privatpersonen sowie in Webapplikationen wie EcoTransIT und EcoPassenger verwendet. Dieser ist jedoch v.a. auf Deutschland beschränkt.

Da ein großer Benutzerkreis eine hohe Nachfrage bedeutet und daher der langfristigen Finanzierung und Support zuträglich ist, spricht dieser Indikator für eine leicht höhere Zukunftsfähigkeit von COPERT.

## **8.4.2. Kommunikation**

### **Verfügbare Publikationen**

TREMOD hat eine deutlich höhere Anzahl an Publikationen für den Bezugsraum Deutschland (sowie auf deutscher Sprache), insbesondere in Form von Studien und Forschungsberichten für öffentliche Institutionen aus verschiedenen Ministerien. International ist die Publikationsliste von COPERT jedoch länger, vor allem, was Studien in „peer-reviewed“ wissenschaftlichen Journalen angeht (vgl. Kapitel 4.3.2, 5.3.2). Dies stellt vom wissenschaftlichen Standpunkt ein kommunikatives Argument für COPERT dar.

## **8.5. Fazit des Modelleignungsvergleichs**

Der Vergleich der Eignung der beiden Modelle COPERT und TREMOD hinsichtlich fünf repräsentativer Anwendungsfälle in Deutschland zeigt je nach Kriterium Vor- und Nachteile beider Modelle auf.

---

<sup>16</sup> Quelloffene Implementation des .NET-Framework, <http://www.mono-project.com/>

Hinsichtlich dem ersten Kriterium der Gruppe „Nutzen“, der **Genauigkeit** der Resultate, wird TREMOD bei einer Mehrheit der berücksichtigten Indikatoren als das geeignetere Modell für die betrachteten Anwendungsfälle in Deutschland beurteilt. Zwar sind die „wahren“ Emissionen eines Landes nicht messbar und damit auch nicht abschließend beurteilbar, welches Modell geringere Abweichungen zur Realität liefert. Ausschlaggebend für die bessere Eignung von TREMOD sind v.a. drei Gründe:

- Die Methodik der Berücksichtigung der **Effizienz des Kraftstoffverbrauchs**. Beide Modelle berücksichtigen sowohl den pro Land unterschiedlichen Einfluss der Größenklassenverteilung und die zeitlichen Veränderungen im spezifischen Energieverbrauch. Bei COPERT steigt jedoch im Durchschnitt aller PKW der spezifische Energieverbrauch um 10% zwischen 2000 und 2010, während gemäß TREMOD in der gleichen Zeitspanne eine Abnahme um 9% resultiert (vgl. Kap. 7.2.2). Dies ist auf die unterschiedliche Methodik der Berücksichtigung der Kraftstoffeffizienz zurückzuführen, welche bei COPERT die Zunahme des durchschnittlichen Fahrzeuggewichts stärker gewichtet. Für Deutschland erscheint angesichts der besseren Übereinstimmung mit der Kraftstoffbilanz und den Fahrleistungen die Methodik von TREMOD plausibler.
- Der **höhere Detaillierungsgrad** von TREMOD, was **Fahrzeugschichten, Straßentypen und Verkehrssituationen** betrifft (vgl. Kapitel 6.1.1, 6.2.1). Zwar sind die möglichen Fehler in den Emissionsresultaten, die durch das Fehlen von Fahrzeugsegmenten mit alternativen Antrieben und das Zusammenfassen von Abgasnachbehandlungstechnologien (wie Fahrzeuge mit/ohne Partikelfilter) in COPERT gemacht werden können, für Ex-Post-Zeiträume bisher gering. Auch die durch unterschiedliche Verteilungen der Levels of Service entstehenden Unterschiede sind auf der nationalen Ebene eher unbedeutend (vgl. Kapitel 7.3.2). In der Zukunft werden die zusätzlichen Fahrzeugschichten voraussichtlich eine signifikante Rolle einnehmen. Die Wahrscheinlichkeit ist natürlich hoch, dass COPERT diese Fahrzeugschichten auch integrieren wird, sobald ihre Fahrleistungen ein relevantes Ausmaß erreichen (z.B. sollen BEV und PHEV in der für 2016 geplanten Version COPERT 5 eingeführt werden); in der hier beurteilten Modellversion fehlen sie jedoch noch. Zudem ist zu beachten, dass die feine Differenzierung in TREMOD z.T. auf expliziten Wunsch der Auftraggeber eingeführt wurde, um Fördermaßnahmen für bestimmte Technologien zu begründen oder zu evaluieren – diese Evaluationen wären mit COPERT nicht möglich.
- Die Abhängigkeit der Ergebnisse von COPERT vom **Aggregationsniveau der Inputs**, welche zu einer zusätzlichen Unsicherheit der Emissionsfaktoren führt (vgl. Kapitel 7.3.1, Smit et al. 2008).

Auch bei der **Anwendbarkeit** als dem zweiten Nutzen-Kriterium weist TREMOD mehr Vorteile gegenüber COPERT auf als umgekehrt. Diese bestehen v.a. in der Abdeckung von Bereichen, welche nicht Teil von COPERT sind, namentlich:

- ein prognosefähiges Flottenmodell (wobei dieser Bereich bei Verwendung von COPERT durch SIBYL abgedeckt werden könnte, allerdings mit zusätzlichen Kosten);
- die vollständigere Berücksichtigung von alternativen Antrieben und Elektrofahrzeugen;
- die Modellierung der Emissionen weiterer Verkehrsträger (Schiene, Luftfahrt, Binnenschifffahrt, mobile Maschinen);
- der Einbezug der Vorkettenemissionen.

COPERT kann diese Bereiche nicht abdecken. Weiter muss berücksichtigt werden, dass die Entwickler von TREMOD sehr flexibel Zusatzfunktionen quasi „nach Maß“ auf Wunsch ihrer Auftraggeber entwickeln können. Beispiele dafür sind die ZSE-Schnittstelle für Berichterstattung, die Auswertung der Ergebnisse nach Fahrzeughaltern für DESTATIS, die Auswertung der Länder- und jahresspezifischen CO<sub>2</sub>-Werte nach UBA-Vorgabe, oder die Umstellung auf Kaufsegmente nach KBA. Ob solche Spezialentwicklungen mit COPERT ebenso einfach möglich wären, ist unklar, da solche Wünsche mit den Bedürfnissen anderer Modellnutzer abgestimmt werden müssten.

COPERT weist hinsichtlich Anwendbarkeit aber auch Vorteile gegenüber TREMOD auf. Zu erwähnen ist diesbezüglich die größere Auswahl an Luftschadstoffen – z.B. Partikelemissionen aus Abrieb und Aufwirbelung können berechnet werden, oder verschiedene Kohlenwasserstoff-Arten, welche in TREMOD fehlen – welche sich in einer höheren Eignung von COPERT für Luftschadstoffinventare auswirkt.

Bei den **Kosten** liegen beide Modelle bei der Mehrzahl der Indikatoren gleichauf. So bewegen sich die Entwicklungskosten in einer ähnlichen Größenordnung – hier muss aber gleichzeitig auf die Schwierigkeit hingewiesen werden, diese Entwicklungskosten zu erheben und abzugrenzen. Auch der Aufwand für die Modellanwendung ist bei beiden Modellen ähnlich hoch. Bei den Aktivitätsdaten hat COPERT die geringeren Kosten, die Ergebnisse weisen allerdings auch einen geringeren Detaillierungsgrad auf und sind auf weniger statistische Grundlagendatensätze abgestützt.

Bei den **weiteren Kriterien** (Zukunftsfähigkeit, Kommunikation) schneidet COPERT insgesamt leicht besser ab. So sind beide Modelle institutionell gut verankert, und die Finanzierung scheint bei beiden langfristig gesichert. Die Abhängigkeit zu den Basisemissionsfaktoren aus HBEFA ist bei beiden Modellen vorhanden. IT-technisch steht jedoch COPERT auf einer etwas flexibleren Basis, und die hohe Anzahl Benutzer sorgt für Nachfrage und damit Kontinuität.



Schließlich existieren mehr Publikationen zu COPERT als zu TREMOD, v.a. in wissenschaftlichen Journalen, mit denen sich ein Einsatz von COPERT gut argumentieren lässt.

**Differenziert nach Anwendungsfällen** lassen sich folgende Schlüsse hinsichtlich der Eignung der beiden Modelle ziehen:

- Für die **Treibhausgas- und Luftschadstoffinventare** (z.B. Berichterstattung gegenüber internationalen Konventionen UNFCCC und CLRTAP) ist TREMOD leicht besser geeignet. Zwar sind einige Stärken von TREMOD bei der nationalen Berichterstattung wenig relevant: So machen in Ex-Post-Betrachtungen die feinere Differenzierung von Fahrzeug- und Straßentypen einen fast vernachlässigbaren Anteil aufs Total aus, und elektrische Antriebe sind aufgrund der Abgrenzung der Inventare nicht relevant. Auch die zusätzlichen Plausibilisierungshilfen sind wenig hilfreich, da bei der Berichterstattung gegenüber internationalen Konventionen sowieso sehr strikt auf Qualitätssicherung geachtet wird. Beim IIR hat COPERT den Vorteil, dass alle zu rapportierenden Schadstoffe modelliert werden können. Ausschlaggebend ist schlussendlich die plausiblere Berücksichtigung der Kraftstoffeffizienz bei TREMOD. Zwar werden Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen in den nationalen Inventaren basierend auf dem statistischen Absatz berechnet – ab der 2. Verpflichtungsperiode (also Submission 2015) des Kyoto-Protokolls wird aber auch die Differenzierung der verursachenden Fahrzeugkategorien verlangt. Diese fällt genauer aus, wenn die Kraftstoffverbrauchsfaktoren im Modell besser stimmen. Dazu kommt, dass wenn (wie bei COPERT) die Fahrleistungen angepasst werden müssen, um die Kraftstoffbilanz einzuhalten, auch die Emissionen der anderen Treibhausgase mitbeeinflusst werden.
- Bei **Zukunftsszenarien und Verkehrsträgervergleich** ist TREMOD klar das geeignetere Modell, da es im Gegensatz zu COPERT auf diese Anwendungen ausgelegt ist; TREMOD verfügt über ein für die Zukunft anwendbares Flottenmodell, es berücksichtigt die Vorkettenemissionen, und es modelliert neben dem Straßenverkehr auch den Schienen- und Luftverkehr, die Binnenschifffahrt und mobile Maschinen. Diese Möglichkeiten fehlen in COPERT.
- Bei **Wirkungsabschätzungen** muss differenziert werden zwischen einem Fokus auf bestimmte Fahrzeugschichten oder Straßenkategorien (z.B. bei der Abschätzung der Wirkung einer Regulierung oder Fördermassnahme) und einem Fokus auf geografisch kleinere Räume (z.B. bei der Evaluation eines lokalen Infrastrukturprojektes). Im ersteren Fall ist TREMOD das geeignetere Modell, weil es in den entsprechenden Dimensionen differenzierter rechnet. Im zweiten Fall sind beide Modelle nur eingeschränkt geeignet, da eine innere Differenzierung des betrachteten Raumes (abgesehen von den Straßentypen) nicht möglich ist.

## 9. Gesamtfazit

Das vorliegende Forschungsvorhaben unterzieht die beiden Straßenverkehrs-Emissionsmodelle COPERT und TREMOD einer kritischen Prüfung, um aufzuzeigen, welches Modell für unterschiedliche Aspekte der Emissionsmodellierung besser geeignet erscheint.

Die detaillierten Beschreibungen der beiden Emissionsmodelle (Kapitel 4 und 5) zeigen, dass verschiedene Querbeziehungen zwischen den beiden Ansätzen bestehen. Beide Modelle nutzen – im Prinzip – dieselben Basis-Emissionsfaktoren für die Bestimmung der betriebswarmen Emissionen: Sowohl TREMOD als auch COPERT nutzt die im Rahmen von HBEFA bzw. ERMES entwickelten Grundlagen. Während in TREMOD die Verwendung der Emissionsfaktoren für die warmen Emissionen grundsätzlich denselben Verkehrssituationen-basierten Ansatz wie HBEFA verwendet, nutzt COPERT die Basisemissionsfaktoren für die Herleitung so genannter Durchschnittsgeschwindigkeitsfunktionen. Große Ähnlichkeiten zwischen den beiden Modellen bestehen zumindest theoretisch bei der Behandlung der jährlichen Entwicklung der Verbrauchswerte (praktisch existieren jedoch für Deutschland relevante Unterschiede, s. weiter unten). Bei den Verdampfungsemissionen kommt bei beiden Modellen der für COPERT entwickelte Ansatz zum Einsatz, während für die Ermittlung der Kaltstartzuschläge beide Modelle eigene Vorgehensweisen implementiert haben.

Trotz diesen Gemeinsamkeiten sind die Unterschiede zwischen beiden Modellen, was sowohl Eingangsdaten wie auch Emissionsresultate betrifft, beträchtlich (s. Kapitel 6 und 7). Bei Verwendung der originalen Inputdaten bewegen sich die Abweichungen des gesamten Verbrauchs pro Jahr bei +/-5%, und die Abweichungen der gesamten Emissionen pro Schadstoff und Jahr bei -1% bis 45%<sup>17</sup>. Bei Verwendung der gleichen Inputdaten liegen die Abweichungen des Verbrauchs pro Jahr bei -2% bis +14% und die Abweichungen der Emissionen bei -4% bis 25%. Die grössten Unterschiede bei den Emissionsfaktoren bestehen bei den Kaltstart- und Verdampfungsemissionen.

Im Gesamtvergleich der beiden Modelle, in welchen die Modellbeschreibungen, die quantitativen Vergleiche, sowie weitere Kriterien wie Kosten und Zukunftsfähigkeit einfließen (Kapitel 8), werden in vielen Punkten beide Modelle als ähnlich gut geeignet beurteilt. Insgesamt wird TREMOD bei einer Mehrheit der Kombinationen von Indikatoren und Anwendungsfällen in der Kriteriengruppe „Nutzen“ als geeigneter beurteilt. Bei den Kriteriengruppen „Kosten“ und „weitere Kriterien“ erhält hingegen COPERT in einer Mehrheit der Fälle die bessere Beurteilung.

---

<sup>17</sup> Die Abweichungen in % sind berechnet als  $(\text{COPERT-Wert}/\text{TREMOD-Wert} - 100\%)$ . Bei positiven Abweichungen hat also COPERT den höheren Wert.

Die als insgesamt als höher eingestufte Eignung von TREMOD in der Kriteriengruppe „Nutzen“ liegt hinsichtlich der Genauigkeit der Resultate v.a. an der feineren Differenzierung der Fahrzeugschichten und dem Einbezug elektrischer Antriebe, der besseren Berücksichtigung der Effizienzsteigerungen des Kraftstoffverbrauchs, sowie der Unabhängigkeit der Ergebnisse vom Aggregationsniveau der Eingangsdaten. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass bei der Frage, ob ein Modell möglichst „wahre“ Ergebnisse liefert, ein Benchmark fehlt, da die Emissionen eines Landes nicht gemessen werden können. Ein solcher Benchmark existiert einzig für den Kraftstoffverbrauch durch die statistische Energiebilanz – dort sind bei TREMOD die geringeren Abweichungen feststellbar, wenn rein auf Statistik beruhende, in keinem Kalibrationsprozess angepasste Aktivitätsdaten verwendet werden.

Differenziert nach Anwendungsfällen lassen sich folgende Schlüsse hinsichtlich der Eignung der beiden Modelle ziehen:

- Für die Treibhausgas- und Luftschadstoffinventare (z.B. Berichterstattung gegenüber internationalen Konventionen UNFCCC und CLRTAP) ist TREMOD v.a. aufgrund der plausibleren Berücksichtigung der Kraftstoffeffizienz leicht besser geeignet: Zwar werden Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen in den nationalen Inventaren basierend auf dem statistischen Absatz berechnet. Die ab der 2. Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls ebenfalls verlangte Differenzierung der verursachenden Fahrzeugkategorien fällt genauer aus, wenn die Kraftstoffverbrauchsfaktoren im Modell die Realität besser abbilden. Dazu kommt, dass wenn (wie bei COPERT) die Fahrleistungen angepasst werden müssen, um die Kraftstoffbilanz einzuhalten, auch die Emissionen der anderen Treibhausgase mitbeeinflusst werden.
- Für Zukunftsszenarien und Verkehrsträgervergleich ist TREMOD klar das geeignetere Modell, da es im Gegensatz zu COPERT auf diese Anwendungen ausgelegt ist.
- Bei Wirkungsabschätzungen muss zwischen einem Fokus auf bestimmte Fahrzeugschichten oder Straßenkategorien (z.B. bei der Abschätzung der Wirkung einer Regulierung oder Fördermassnahme) und einem Fokus auf geografisch kleinere Räume (z.B. bei der Evaluation eines lokalen Infrastrukturprojektes) unterschieden werden. Im ersteren Fall ist TREMOD geeigneter, weil es in den entsprechenden Dimensionen differenzierter rechnet. Im zweiten Fall sind beide Modelle nur eingeschränkt geeignet, da eine innere Differenzierung des betrachteten Raumes weder bei COPERT noch bei TREMOD vorgesehen ist.

## Anhang

### A1. Kurzübersichten Verkehrsemissionsmodelle

Tabelle 37: Übersicht TREMOD		
Vollständiger Name	Transport- und Emissionsmodell (TREMOD)	
Geschichte, Einbettung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Seit 1997 (Version 1.0), regelmäßige Aktualisierungen (rund alle 2 Jahre); Aktuelle Version 5.3 (2012), Entwicklung und Unterhalt im Auftrag des Deutschen Umweltbundesamt (UBA)</li> <li>▪ Unterstützt und genutzt von: Umweltbundesamt (UBA), Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und verschiedene Bundesministerien, Verband der Automobilindustrie (seit 1996), Mineralölwirtschaftsverband (seit 1996), Deutsche Bahn AG (seit 1997), Deutsche Lufthansa (seit 2006) und TUI (seit 2006).</li> </ul>	
Modellentwickler	Institut für Energie- und Umweltforschung IFEU, Heidelberg, Deutschland; <a href="http://www.ifeu.org">www.ifeu.org</a>	
Modelltyp und -methodik	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Emissionsfaktoren nach Fahrzeugschichten und nach Verkehrssituationen (Emissionsfaktoren von HBEFA werden verwendet)</li> <li>▪ Verkehrssituationen-Ansatz</li> <li>▪ Berechnungen nach Straßenkategorien und Verkehrssituationen</li> <li>▪ Verknüpfung mit Verkehrsaktivitätsdaten</li> </ul>	
Softwaregrundlage	Microsoft Access	
Submodelle	Flotte	Flottenmodell (Bestände, Neuzugänge, Altersverteilungen, spezifische Fahrleistungen)
	Aktivitäten (Fahrleist.)	Fahrleistungsmodul erstellt Fahrleistungsinput (Zählungen, Fahrleistungsuntersuchungen, Mobilitätsbefragungen)
	Emissionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tank-to-Wheel; „Warme“ Emissionen, Kaltstart-, Verdampfungsemissionen, Klimaanlage (KST-Verbrauch)</li> <li>▪ Well-to-Wheel-Emissionen aus der Energiebereitstellung</li> </ul>
Komponenten (Schadstoffe, Treibhausgase, Verbrauch)	CO, HC, NO <sub>x</sub> , PM (Auspuff), PN, NO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NMHC, Benzol, Toluol, Xylol, Kraftstoffverbrauch (Benzin, Diesel), CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, BC	
Fahrzeugtypen und -Klassen	Anzahl (Straße)	Rund 400
	Kategorien	PKW, LNF, KR, LBus, RBus, SNF (LKW, Sattel-, Lastenzüge); Bahnen, Flugzeuge, Binnenschiffe
	Kraftstoffarten	Diesel, Benzin, LPG, CNG, LNG (SNF), E85, Strom
	Technologien/ Konzepte	Hubraumklassen, Gesamtgewicht, Emissionskonzept (EURO-Stufen), DPF, EGR/SCR, BEV, PHEV.
Eingangsdaten	Flotte	Bestand aus Fahrzeugregistrationsdaten, Fahrleistung, Fahrtlängenverteilung
	Fahrverhalten	276 Verkehrssituationen (analog HBEFA)
	Steigung	-6, -4, -2, 0, +2, +4, +6%
	Beladung	Auslastungsmuster (nur SNF)
	Umgebung	Umgebungsmuster (Temperatur, Feuchtigkeit)
	KST-Qualität	RVP, CO <sub>2</sub> -, S-, Pb-Gehalt, Dichte, Heizwert.
Weitere	Kraftstoffverbrauch (Top-Down)	
Modellgrundlagen/-quellen	Emissionsfaktoren: siehe HBEFA	
Auflösung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Räumlich: Straßentypen</li> <li>▪ Zeitlich: Flexibel, aktuelle Version enthält Resultate für die Jahre 1960-2030</li> </ul>	

Besonderes	Szenarienberechnung,
Anwendungsbereich(e)	Nationale Emissionsinventare, Life-Cycle-Datenbanken, Input für Tools für die Beurteilung von Verkehrsträgern (EcoTransIT, EcoPassenger), Flottendaten für TRE-MOVE, HBEFA und COPERT, Szenariengewertungen.
Zugang	Nicht öffentlich zugänglich.

<b>Tabelle 38: Übersicht COPERT</b>		
<b>Vollständiger Name</b>	<b>Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport (COPERT)</b>	
Geschichte, Einbettung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Seit 1989 bis heute; laufende Weiterentwicklungen und Aktualisierungen</li> <li>▪ Weiterentwicklungen finanziert und koordiniert durch EEA, wissenschaftliche Unterstützung durch die Europäische Kommission (JRC)</li> </ul>	
Modellentwickler	EMISIA SA und LAT/AUTH (Laboratory of Applied Thermodynamics/Aristotle University of Thessaloniki)	
Modelltyp und -methodik	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Emissionsfaktoren nach Fahrzeugschichten</li> <li>▪ Durchschnittsgeschwindigkeitsansatz</li> <li>▪ streckenspezifische bzw. aggregierte (Raumeinheiten) Berechnungen.</li> </ul>	
Softwaregrundlage	Microsoft Visual Studio .NET 2003 <sup>®</sup> mit Benutzeroberfläche (Office-ähnlich)	
Submodelle	Flotte	Separates Flottenmodell Sybil/FCM (Bestände, Neuzugänge, Altersverteilungen, spezifische Fahrleistungen)
	Aktivitäten (Fahrleist.)	Externe Daten (3 Tier-Ansatz)
	Emissionen	Tank-to-Wheel; „Warme“ Emissionen, Kaltstart-, Verdampfungsemissionen, Nicht-Auspuffem. (Abrieb, Aufwirbelung), Klimaanlage (KST-Verbrauch und direkte Em.).
Komponenten (Schadstoffe, Treibhausgase, Verbrauch)	CO, NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM, EC, OM, NH <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub> , HC, NMHC, verschiedene Metalle (inkl. Pb), KST-Verbrauch	
Fahrzeugtypen und -Klassen	Anzahl (Straße)	267
	Kategorien	PKW, LNF, KR, LBus, RBus, SNF
	Kraftstoffarten	Diesel, Benzin, LPG, CNG, LNG (SNF), E85, E10
	Technologien/ Konzepte	Hubraumklassen, Gesamtgewicht, Emissionskonzept (EURO-Stufen), Tankgröße, Hybride, Einspritztechnologie
Eingangsdaten	Flotte	Bestand aus Fahrzeugregistrationsdaten, jährliche Fahrleistung
	Fahrverhalten	Durchschnittsgeschwindigkeiten (ländlich, städtisch, Autobahn)
	Steigung	Steigungskorrekturen (nur SNF) für -6, -4, -2, 0, +2, +4, +6%
	Beladung	Auslastung (nur SNF)
	Umgebung	Umgebungsmuster (Temperatur, Feuchtigkeit)
	KST-Qualität	RVP, CO <sub>2</sub> -, S-, Pb-Gehalt, Dichte, Heizwert.
	Weitere	Kraftstoffverbrauch (Top-Down) für Kalibration
Modellgrundlagen/-quellen	Umfassende Prüfstandsmessungen für unterschiedliche Zyklen (warm, kalt) aus den ERMES/HBEFA Programmen, Herleitungen aus anderen Quellen (Metalle, nicht-Auspuff-Emissionen)	
Auflösung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Räumlich: Fahrmuster</li> <li>▪ Zeitlich: Flexibel, abhängig von der räumlichen Auflösung</li> </ul>	
Besonderes	Altersabhängige Verschlechterungsfaktoren, Klimaanlagekorrektur, umfassende Ableitung von HC/PM/NO <sub>x</sub> -Emissionen	
Anwendungsbereich(e)	Nationale, städtische, lokale Emissionsinventare, Verknüpfung mit Makroskopischen Modellen, Tunnelmodellierungen, Wirkungsabschätzungen Luftqualität, Stanarienanalysen	
Zugang	Öffentlich; Kostenloser download der Software; Länderdatensätze sind kostenpflichtig (300 EURO/Land; 3.000 EURO für EU28)	

<b>Tabelle 39: Übersicht HBEFA</b>		
<b>Vollständiger Name</b>	<b>Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA)</b>	
Geschichte, Einbettung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Seit 1995 (Version 1.1), regelmäßige Aktualisierungen (ca. all 4-5 Jahre). Aktuelle Version: 3.2 (2014).</li> <li>▪ Entwicklung im Auftrag der Umweltbundesämter von Deutschland, Österreich, Schweiz, Norwegen, des Schwedischen Zentralamts für Verkehrswesen („Trafikverket“), der Französischen Umwelt- und Energiemanagementagentur (ADEME).</li> <li>▪ Unterstützt durch das Forschungszentrum der Europäischen Kommission (JRC).</li> </ul>	
Modellentwickler	INFRAS AG, Bern, Schweiz; www.hbefa.net	
Modelltyp und -methodik	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Emissionsfaktoren nach Fahrzeugschichten und nach Verkehrssituationen</li> <li>▪ Verkehrssituationen-Ansatz</li> <li>▪ streckenspezifische bzw. aggregierte (Raumeinheiten) Berechnungen.</li> <li>▪ Verknüpfung mit Verkehrsaktivitätsdaten</li> </ul>	
Softwaregrundlage	Microsoft Access (2010; Runtime), Visual Basic for Applications	
Submodelle	Flotte	Flottenmodell (Bestände, Neuzugänge, Altersverteilungen, spezifische Fahrleistungen)
	Aktivitäten (Fahrleist.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fahrleistungen aus Flottenmodell</li> <li>▪ externe Daten (z.B. Verkehrsmodell)</li> </ul>
	Emissionen	Tank-to-Wheel; „Warme“ Emissionen, Kaltstart-, Verdampfungsemissionen, Nicht-Auspuffem. (Abrieb, Aufwirbelung), Klimaanlage (KST-Verbrauch)
Komponenten (Schadstoffe, Treibhausgase, Verbrauch)	Luftschadstoffe: CO, NO <sub>x</sub> , PM (Auspuff, Abrieb), PN, NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , HC, NMHC, Pb, Cd, Zn, Benzol, Toluol, Xylol. Treibhausgase: CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, KST-Verbrauch (Masse, Energie)	
Fahrzeugtypen und -Klassen	Anzahl	Rund 400
	Kategorien	PKW, LNF, KR, LBus, RBus, SNF (LKW, Sattel-, Lastenzüge)
	Kraftstoffarten	Diesel, Benzin, LPG, CNG, E85, Strom
	Technologien/ Konzepte	Hubraumklassen, Gesamtgewicht, Emissionskonzept (EURO-Stufen), DPF, EGR/SCR, BEV, PHEV.
Eingangsdaten	Flotte	Bestand aus Fahrzeugregistrationsdaten, Fahrleistung, Fahrtlängenverteilung (Mittelwerte für 6 Länder)
	Fahrverhalten	276 Verkehrssituationen (Raum-, Straßentyp, Geschwindigkeitslimite, Verkehrsqualitätsstufe)
	Steigung	-6, -4, -2, 0, +2, +4, +6%
	Beladung	Auslastungsmuster (nur SNF)
	Umgebung	Umgebungsmuster (Temperatur, Feuchtigkeit)
	KST-Qualität	RVP, CO <sub>2</sub> -, S-, Pb-Gehalt, Dichte, Heizwert
Weitere	Kraftstoffverbrauch (Top-Down)	
Modellgrundlagen/-quellen	Warm: Fahrzeugemissionsmessungen für real-world Fahrzyklen (PHEM); Kaltstart: spezifische Kaltstartzyklen (EMPA-Modell); Verdampfung: COPERT-Ansatz.	
Auflösung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Räumlich: Flexibel (Strecken oder Raumeinheiten), je nach Eingangsdaten.</li> <li>▪ Zeitlich: Flexibel, Standardwerte 1990-2030 für 6 Länder.</li> </ul>	
Besonderes	Aufgebaut als Szenarien-Tool; Direkter Bezug zu PHEM (warme Emissionsfaktoren); Altersabhängige Verschlechterungsfaktoren; Kraftstoffqualitäts-Korrekturen	
Anwendungsbereich(e)	Nationale, regionale, lokale Emissionsinventare, Wirkungsabschätzungen, Input für Immissionsmodelle, Szenarienanalysen. THG-Emissionen China.	
Zugang	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Public-Version (Emissionsfaktorendatenbank): Öffentlich (250 EURO)</li> <li>▪ Expert-Version (erweiterte Funktionalitäten): nur für Mitentwickler/Datenlieferanten.</li> </ul>	

Tabelle 40: Übersicht VERSIT+		
Vollständiger Name	VERSIT+	
Geschichte, Einbettung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Seit 2005 bis heute; laufende Weiterentwicklungen und Aktualisierungen</li> <li>▪ VERSIT+ ist die Grundlage für die Erstellung der offiziellen Emissionsfaktoren für die Niederlande.</li> <li>▪ Eigenentwicklung von TNO: TNO ist staatlich grundfinanziert und finanziert die Entwicklung von VERSIT+ über diese Quelle. Weitere Finanzierungen werden über spezifische Projekte vorgenommen.</li> </ul>	
Modellentwickler	TNO, Niederländisches Institut für angewandte Forschung, Den Haag, Niederlande; www.tno.nl	
Modelltyp und -methodik	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Statistisches Vorhersagemodell (Regressionen), basierend auf Messungen für unterschiedliche Fahrzeugtypen</li> <li>▪ Fahrzyklen-basiert, sekundenscharfe Vorhersagen der Emissionen</li> </ul>	
Softwaregrundlage	-	
Submodelle	Flotte	Separate Modellierung (außerhalb VERSIT+)
	Aktivitäten (Fahrleist.)	Externer Input (Verkehrsmodell)
	Emissionen	Tank-to-Wheel; „Warme“ Emissionen, Abriebs-Emissionen
Komponenten (Schadstoffe, Treibhausgase, Verbrauch)	CO, HC, NO <sub>x</sub> , CO <sub>2</sub> , Kraftstoffverbrauch, NO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , PM, EC, Abrieb (PM)	
Fahrzeugtypen und -Klassen	Anzahl	335
	Kategorien	PKW, LNF, Busse, LKW, Sattelzüge
	Kraftstoffarten	Diesel, Benzin, LPG, CNG
	Technologien/ Konzepte	Emissionskonzept (EURO-Stufen), DPF, HEV, PHEV, Nennleistung und Nutzlast für SNF
Eingangsdaten	Flotte	Gewichtungsfaktoren (Fahrleistung) aus externem Flottenmodell, basierend auf Daten des Niederländischen Statistikbüros (CBS)
	Fahrverhalten	Fahrzyklen (Geschwindigkeits-Zeitverläufe; 1Hz)
	Steigung	„angepasste Beschleunigung“ (separates Modell)
	Beladung	SNF Masse (Tara und Nutzlast)
	Umgebung	-
	KST-Qualität	-
Weitere	Typenzulassungsdaten (CO)	
Modellgrundlagen/-quellen	Modal (1Hz) und Bag-Emissionsmessungen für verschiedene Testzyklen (Prüfstandsmessungen), PEMS-Daten	
Auflösung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Räumlich: variabel, abhängig von der zeitlichen Auflösung</li> <li>▪ Zeitlich: 1Hz</li> </ul>	
Besonderes	SNF-Algorithmus auf PEMS-Daten basierend	
Anwendungsbereich(e)	Nationale Emissionsinventare, Niederländisches Luftqualitätsmodell und Emissionsfaktor-Entwicklung, Maßnahmenbeurteilung, Schnittstelle zu Verkehrsmodellen (EnViver)	
Zugang	Nicht öffentlich zugänglich. Publikation ausgewählter Resultate (Emissionen, Emissionsfaktoren) durch die zuständigen staatlichen Stellen.	



<b>Tabelle 41: Übersicht LIISA (Submodel von LIPASTO)</b>		
<b>Vollständiger Name</b>	<b>LIISA</b>	
Geschichte, Einbettung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Seit 1988 (LIPASTO), LIISA 1996; laufende Weiterentwicklungen und Aktualisierungen</li> <li>▪ Entwicklung finanziert vom Umweltministerium, Verkehrs- und Kommunikationsministerium Finnland, Neste Oyj und VTT; Aktualisierungen finanziert durch das Statistische Amt Finnlands.</li> </ul>	
Modellentwickler	Technical Research Centre of Finland (VTT), Helsinki, Finnland; www.lipasto.vtt.fi	
Modelltyp und -methodik	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modell für die Emissionsmodellierung von Raumeinheiten</li> <li>▪ Emissionskoeffizienten aus eigener (VTT) Zusammenstellung unter Verwendung unterschiedlicher Quellen.</li> </ul>	
Softwaregrundlage	-	
Submodelle	Flotte	Separate Modellierung (außerhalb LIISA)
	Aktivitäten (Fahrleist.)	Externer Input (Statistische Auswertungen)
	Emissionen	Tank-to-Wheel; „Warme“ Emissionen, Kaltstarts
Komponenten (Schadstoffe, Treibhausgase, Verbrauch)	CO, HC, NO <sub>x</sub> , PM, CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , Kraftstoffverbrauch	
Fahrzeugtypen und -Klassen	Anzahl	unbekannt
	Kategorien	PKW, LNF, Busse, SNF (LKW, Sattel-/Lastenzüge), Zweiräder
	Kraftstoffarten	Diesel, Benzin, neu formuliertes Benzin
	Technologien/ Konzepte	Emissionskonzept (EURO-Stufen), Katalisatoren
Eingangsdaten	Flotte	Flottenzusammensetzung aus Statistik und Flottenmodellierung (Neuzugänge)
	Fahrverhalten	Mittlere Emissionsfaktoren nach städtisch, Autobahn, Durchschnittsfahrverhalten
	Steigung	-
	Beladung	Auslastungsfaktoren für SNF
	Umgebung	-
	KST-Qualität	CO <sub>2</sub> -, S-, Dichte, Heizwert
	Weitere	-
Modellgrundlagen/-quellen	Emissionsfaktoren aus HBEFA, ARTEMIS, COPERT und eigene Messungen.	
Auflösung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Räumlich: Straßentypen, städtisch, Autobahn, Durchschnitt</li> <li>▪ Zeitlich: Jährlich bis 2012 (statistik); Prognosen bis 2032</li> </ul>	
Besonderes	-	
Anwendungsbereich(e)	Nationale, regionale und lokale Emissionsinventare, Maßnahmenbeurteilung, Emissionsprognosen	
Zugang	Nicht öffentlich zugänglich. Publikation ausgewählter Emissionsfaktoren über die Website von VTT.	

## A2. Eingangsdaten und Modellergebnisse

### A2.1. Originale Aktivitätsdaten

#### A2.1.1. Fahrleistungen, 2000-2013

Tabelle 42: Fahrleistungen gemäß den Aktivitätsdaten von TREMOD und COPERT, nach Fahrzeugkategorie, 2000-2013.				
Fahrzeugkategorie	Jahr	Fahrleistungen [Mio. Fzkm]		Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
		TREMOD	COPERT	
PKW	2000	560'300	543'090	-3%
PKW	2001	571'300	539'429	-6%
PKW	2002	579'500	541'614	-7%
PKW	2003	574'500	533'223	-7%
PKW	2004	586'988	540'466	-8%
PKW	2005	574'810	528'982	-8%
PKW	2006	580'522	540'163	-7%
PKW	2007	584'139	532'791	-9%
PKW	2008	581'202	528'684	-9%
PKW	2009	591'597	528'032	-11%
PKW	2010	595'539	530'212	-11%
PKW	2011	605'242	538'512	-11%
PKW	2012	606'525	530'119	-13%
PKW	2013	613'179	533'018	-13%
LNF	2000	35'985	37'920	5%
LNF	2001	37'874	37'540	-1%
LNF	2002	39'871	38'197	-4%
LNF	2003	40'562	37'487	-8%
LNF	2004	41'083	38'204	-7%
LNF	2005	41'516	37'103	-11%
LNF	2006	37'985	32'639	-14%
LNF	2007	38'950	33'223	-15%
LNF	2008	38'458	34'394	-11%
LNF	2009	38'427	34'938	-9%
LNF	2010	38'579	36'317	-6%
LNF	2011	39'201	36'189	-8%
LNF	2012	39'729	36'229	-9%
LNF	2013	39'954	35'725	-11%
SNF	2000	55'441	70'862	28%
SNF	2001	55'811	69'416	24%
SNF	2002	56'024	67'304	20%
SNF	2003	56'139	62'838	12%
SNF	2004	56'404	62'125	10%
SNF	2005	54'213	59'444	10%
SNF	2006	56'159	59'360	6%
SNF	2007	57'873	58'999	2%
SNF	2008	57'819	57'583	0%

Tabelle 42: Fahrleistungen gemäß den Aktivitätsdaten von TREMOD und COPERT, nach Fahrzeugkategorie, 2000-2013.				
Fahrzeugkategorie	Jahr	Fahrleistungen [Mio. Fzkm]		Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
		TREMOD	COPERT	
SNF	2009	53'974	56'463	5%
SNF	2010	56'418	58'552	4%
SNF	2011	58'140	59'257	2%
SNF	2012	56'749	60'141	6%
SNF	2013	57'088	59'680	5%
Bus	2000	4'138	3'955	-4%
Bus	2001	4'162	3'714	-11%
Bus	2002	4'087	3'729	-9%
Bus	2003	4'016	3'658	-9%
Bus	2004	4'006	3'729	-7%
Bus	2005	3'936	3'551	-10%
Bus	2006	3'938	3'611	-8%
Bus	2007	3'826	3'498	-9%
Bus	2008	3'736	3'514	-6%
Bus	2009	3'751	3'538	-6%
Bus	2010	3'751	3'618	-4%
Bus	2011	3'729	3'636	-2%
Bus	2012	3'751	3'682	-2%
Bus	2013	3'729	3'657	-2%
KR	2000	15'100	24'097	60%
KR	2001	15'438	22'516	46%
KR	2002	15'921	22'641	42%
KR	2003	15'957	21'541	35%
KR	2004	16'471	21'260	29%
KR	2005	16'800	20'085	20%
KR	2006	17'288	19'615	13%
KR	2007	14'904	18'943	27%
KR	2008	15'322	19'167	25%
KR	2009	15'753	18'926	20%
KR	2010	15'786	18'284	16%
KR	2011	16'169	18'098	12%
KR	2012	16'169	17'523	8%
KR	2013	16'169	18'007	11%

## A2.1.2. Bestand, 2000-2013

Tabelle 43: Fahrzeugbestand gemäß den Aktivitätsdaten von TREMOD und COPERT, nach Fahrzeugkategorie, 2000-2013.				
Fahrzeugkategorie	Jahr	Bestand [1000 Fahrzeuge]		Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
		TREMOD	COPERT	
PKW	2000	42'833	42'799	0%
PKW	2001	44'078	44'050	0%
PKW	2002	44'520	44'500	0%
PKW	2003	44'840	44'826	0%
PKW	2004	45'199	45'192	0%
PKW	2005	45'733	45'733	0%
PKW	2006	46'330	46'330	0%
PKW	2007	46'471	46'528	0%
PKW	2008	41'252	41'252	0%
PKW	2009	41'529	41'529	0%
PKW	2010	42'020	42'020	0%
PKW	2011	42'615	42'584	0%
PKW	2012	43'179	42'209	-2%
PKW	2013	43'641	41'833	-4%
LNF	2000	2'167	2'174	0%
LNF	2001	2'267	2'278	0%
LNF	2002	2'309	2'320	1%
LNF	2003	2'324	2'333	0%
LNF	2004	2'339	2'342	0%
LNF	2005	2'358	2'358	0%
LNF	2006	2'035	2'035	0%
LNF	2007	2'085	2'084	0%
LNF	2008	1'880	1'880	0%
LNF	2009	1'922	1'922	0%
LNF	2010	1'975	1'975	0%
LNF	2011	2'045	1'970	-4%
LNF	2012	2'113	1'965	-7%
LNF	2013	2'169	1'960	-10%
SNF	2000	1'152	1'215	6%
SNF	2001	1'198	1'252	4%
SNF	2002	1'170	1'210	3%
SNF	2003	1'129	1'154	2%
SNF	2004	1'112	1'116	0%
SNF	2005	1'098	1'098	0%
SNF	2006	1'034	1'034	0%
SNF	2007	1'033	1'033	0%
SNF	2008	893	893	0%
SNF	2009	880	880	0%
SNF	2010	876	876	0%
SNF	2011	887	882	-1%

Tabelle 43: Fahrzeugbestand gemäß den Aktivitätsdaten von TREMOD und COPERT, nach Fahrzeugkategorie, 2000-2013.				
Fahrzeugkategorie	Jahr	Bestand [1000 Fahrzeuge]		Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
		TREMOD	COPERT	
SNF	2012	892	888	-1%
SNF	2013	890	893	0%
Bus	2000	86	86	0%
Bus	2001	86	86	0%
Bus	2002	86	86	0%
Bus	2003	86	86	0%
Bus	2004	86	86	0%
Bus	2005	85	85	0%
Bus	2006	84	84	0%
Bus	2007	83	83	0%
Bus	2008	75	75	0%
Bus	2009	76	76	0%
Bus	2010	76	76	0%
Bus	2011	76	77	1%
Bus	2012	76	77	2%
Bus	2013	76	78	2%
KR	2000	5'059	5'059	0%
KR	2001	5'050	5'050	0%
KR	2002	5'263	5'263	0%
KR	2003	5'260	5'260	0%
KR	2004	5'426	5'344	-1%
KR	2005	5'640	5'406	-4%
KR	2006	5'755	5'452	-5%
KR	2007	5'933	5'477	-8%
KR	2008	5'596	5'041	-10%
KR	2009	5'905	5'100	-14%
KR	2010	5'899	5'155	-13%
KR	2011	5'911	5'193	-12%
KR	2012	6'042	5'232	-13%
KR	2013	6'108	5'270	-14%

### A2.1.3. Starts/Stopps, 2000-2013

Tabelle 44: Startvorgänge gemäß den Aktivitätsdaten von TREMOD und COPERT, nach Fahrzeugkategorie, 2000-2013. Die Anzahl Stoppvorgänge ist gleich der Anzahl Startvorgänge.				
Fahrzeugkategorie	Jahr	Mio. Startvorgänge/Jahr		Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
		TREMOD	COPERT	
PKW	2000	38'910	45'246	16%
PKW	2001	39'673	44'957	13%
PKW	2002	40'242	45'142	12%
PKW	2003	39'895	44'439	11%

Tabelle 44: Startvorgänge gemäß den Aktivitätsdaten von TREMOD und COPERT, nach Fahrzeugkategorie, 2000-2013. Die Anzahl Stoppvorgänge ist gleich der Anzahl Startvorgänge.				
Fahrzeugkategorie	Jahr	Mio. Startvorgänge/Jahr		Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
		TREMOD	COPERT	
PKW	2004	40'761	45'048	11%
PKW	2005	39'874	44'085	11%
PKW	2006	40'172	45'018	12%
PKW	2007	40'368	44'390	10%
PKW	2008	39'940	44'051	10%
PKW	2009	40'500	44'012	9%
PKW	2010	40'686	44'181	9%
PKW	2011	41'300	44'890	9%
PKW	2012	41'358	44'175	7%
PKW	2013	41'797	44'420	6%
LNF	2000	2'499	3'161	26%
LNF	2001	2'630	3'128	19%
LNF	2002	2'769	3'184	15%
LNF	2003	2'817	3'125	11%
LNF	2004	2'853	3'184	12%
LNF	2005	2'883	3'092	7%
LNF	2006	2'626	2'720	4%
LNF	2007	2'689	2'769	3%
LNF	2008	2'649	2'866	8%
LNF	2009	2'643	2'912	10%
LNF	2010	2'650	3'027	14%
LNF	2011	2'692	3'015	12%
LNF	2012	2'728	3'019	11%
LNF	2013	2'741	2'977	9%
KR	2000	1'049	-	n/a
KR	2001	1'072	-	n/a
KR	2002	1'106	-	n/a
KR	2003	1'108	-	n/a
KR	2004	1'144	-	n/a
KR	2005	1'167	-	n/a
KR	2006	1'201	-	n/a
KR	2007	1'035	-	n/a
KR	2008	1'064	-	n/a
KR	2009	1'094	-	n/a
KR	2010	1'096	-	n/a
KR	2011	1'123	-	n/a
KR	2012	1'123	-	n/a
KR	2013	1'123	-	n/a

## A2.1.4. Fahrleistungen PKW, 2014-2030

Tabelle 45: Fahrleistungen von PKW gemäß den Aktivitätsdaten von TREMOD und COPERT, 2014-2030.				
Fahrzeugkategorie	Jahr	Fahrleistungen [Mio. Fzkm]		Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
		TREMOD	COPERT	
PKW	2014	618'665	536'627	-13%
PKW	2015	621'095	540'106	-13%
PKW	2016	623'516	539'590	-13%
PKW	2017	625'955	539'293	-14%
PKW	2018	628'367	538'359	-14%
PKW	2019	630'815	537'925	-15%
PKW	2020	633'218	537'124	-15%
PKW	2021	635'676	536'349	-16%
PKW	2022	638'086	535'600	-16%
PKW	2023	640'544	534'720	-17%
PKW	2024	642'917	533'770	-17%
PKW	2025	645'418	532'749	-17%
PKW	2026	647'767	532'231	-18%
PKW	2027	650'302	531'499	-18%
PKW	2028	652'617	530'664	-19%
PKW	2029	655'201	529'199	-19%
PKW	2030	657'548	527'910	-20%

## A2.1.5. Bestand PKW, 2014-2030

Tabelle 46: Bestand PKW gemäß den Aktivitätsdaten von TREMOD und COPERT, 2014-2030.				
Fahrzeugkategorie	Jahr	Bestand [1000 Fahrzeuge]		Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
		TREMOD	COPERT	
PKW	2014	43'858	42'355	-3%
PKW	2015	44'435	42'783	-4%
PKW	2016	44'818	43'399	-3%
PKW	2017	45'265	43'914	-3%
PKW	2018	45'641	44'656	-2%
PKW	2019	46'008	45'328	-1%
PKW	2020	46'244	45'955	-1%
PKW	2021	46'555	46'446	0%
PKW	2022	46'753	46'926	0%
PKW	2023	46'943	47'286	1%
PKW	2024	47'163	47'615	1%
PKW	2025	47'378	47'824	1%
PKW	2026	47'535	47'965	1%
PKW	2027	47'647	47'999	1%
PKW	2028	47'769	47'918	0%
PKW	2029	47'882	47'716	0%

PKW	2030	47'925	47'419	-1%
-----	------	--------	--------	-----

## A2.2. Modellergebnisse bei Verwendung der originalen Aktivitätsdaten

Fahrzeug-kategorie	Jahr	Schadstoff	Verbrauch/Emissionen		Einheit	Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
			TREMOD	COPERT		
PKW	2000	Kraftstoffverbrauch	1'550'082	1'468'861	TJ	-5%
PKW	2001	Kraftstoffverbrauch	1'573'817	1'457'960	TJ	-7%
PKW	2002	Kraftstoffverbrauch	1'579'962	1'462'346	TJ	-7%
PKW	2003	Kraftstoffverbrauch	1'550'190	1'438'062	TJ	-7%
PKW	2004	Kraftstoffverbrauch	1'567'493	1'454'291	TJ	-7%
PKW	2005	Kraftstoffverbrauch	1'526'605	1'417'071	TJ	-7%
PKW	2006	Kraftstoffverbrauch	1'513'973	1'442'468	TJ	-5%
PKW	2007	Kraftstoffverbrauch	1'506'336	1'418'397	TJ	-6%
PKW	2008	Kraftstoffverbrauch	1'485'490	1'400'673	TJ	-6%
PKW	2009	Kraftstoffverbrauch	1'501'623	1'396'115	TJ	-7%
PKW	2010	Kraftstoffverbrauch	1'499'287	1'397'585	TJ	-7%
PKW	2011	Kraftstoffverbrauch	1'509'447	1'419'626	TJ	-6%
PKW	2012	Kraftstoffverbrauch	1'497'826	1'395'799	TJ	-7%
PKW	2013	Kraftstoffverbrauch	1'500'572	1'404'092	TJ	-6%
PKW	2000	CO2	112'187'083	107'008'209	t	-5%
PKW	2001	CO2	113'979'151	106'242'435	t	-7%
PKW	2002	CO2	114'485'297	106'597'634	t	-7%
PKW	2003	CO2	112'356'938	104'865'813	t	-7%
PKW	2004	CO2	113'713'220	106'090'565	t	-7%
PKW	2005	CO2	110'763'688	103'420'588	t	-7%
PKW	2006	CO2	109'801'334	105'291'745	t	-4%
PKW	2007	CO2	109'256'394	103'523'003	t	-5%
PKW	2008	CO2	107'751'243	102'191'433	t	-5%
PKW	2009	CO2	108'933'189	101'803'108	t	-7%
PKW	2010	CO2	108'776'702	101'958'155	t	-6%
PKW	2011	CO2	109'539'401	103'574'670	t	-5%
PKW	2012	CO2	108'723'619	101'860'765	t	-6%
PKW	2013	CO2	108'971'862	102'474'139	t	-6%
PKW	2000	HC	241'566	296'193	t	23%
PKW	2001	HC	220'617	267'834	t	21%
PKW	2002	HC	196'672	245'797	t	25%
PKW	2003	HC	173'773	221'998	t	28%
PKW	2004	HC	156'235	204'210	t	31%
PKW	2005	HC	137'187	180'350	t	31%



Tabelle 47: Kraftstoffverbrauch und Emissionen bei Verwendung der originalen Aktivitätsdaten von TREMOD und COPERT, 2000-2013.						
Fahrzeug-kategorie	Jahr	Schadstoff	Verbrauch/Emissionen		Einheit	Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
			TREMOD	COPERT		
PKW	2006	HC	123'330	165'907	t	35%
PKW	2007	HC	113'306	150'800	t	33%
PKW	2008	HC	98'624	135'577	t	37%
PKW	2009	HC	92'444	125'087	t	35%
PKW	2010	HC	86'207	115'249	t	34%
PKW	2011	HC	82'511	107'095	t	30%
PKW	2012	HC	77'934	95'318	t	22%
PKW	2013	HC	74'470	88'343	t	19%
PKW	2000	NOx	357'840	321'536	t	-10%
PKW	2001	NOx	350'707	300'838	t	-14%
PKW	2002	NOx	338'738	290'009	t	-14%
PKW	2003	NOx	319'638	275'917	t	-14%
PKW	2004	NOx	314'110	271'418	t	-14%
PKW	2005	NOx	292'541	253'864	t	-13%
PKW	2006	NOx	276'250	252'604	t	-9%
PKW	2007	NOx	263'159	241'413	t	-8%
PKW	2008	NOx	237'761	232'237	t	-2%
PKW	2009	NOx	229'033	223'246	t	-3%
PKW	2010	NOx	221'713	221'272	t	0%
PKW	2011	NOx	221'848	218'934	t	-1%
PKW	2012	NOx	220'910	213'491	t	-3%
PKW	2013	NOx	222'612	209'141	t	-6%
PKW	2000	PM10 (Abgas)	14'305	13'275	t	-7%
PKW	2001	PM10 (Abgas)	14'404	12'061	t	-16%
PKW	2002	PM10 (Abgas)	13'787	11'618	t	-16%
PKW	2003	PM10 (Abgas)	12'662	11'069	t	-13%
PKW	2004	PM10 (Abgas)	13'142	11'112	t	-15%
PKW	2005	PM10 (Abgas)	12'511	10'191	t	-19%
PKW	2006	PM10 (Abgas)	11'833	10'570	t	-11%
PKW	2007	PM10 (Abgas)	10'718	10'366	t	-3%
PKW	2008	PM10 (Abgas)	9'202	10'221	t	11%
PKW	2009	PM10 (Abgas)	8'218	10'065	t	22%
PKW	2010	PM10 (Abgas)	7'395	9'295	t	26%
PKW	2011	PM10 (Abgas)	6'735	8'489	t	26%
PKW	2012	PM10 (Abgas)	5'959	7'638	t	28%
PKW	2013	PM10 (Abgas)	5'345	6'728	t	26%
LNF	2000	Kraftstoffverbrauch	111'784	148'606	TJ	33%
LNF	2001	Kraftstoffverbrauch	116'549	145'728	TJ	25%
LNF	2002	Kraftstoffverbrauch	121'314	147'158	TJ	21%
LNF	2003	Kraftstoffverbrauch	122'388	143'487	TJ	17%
LNF	2004	Kraftstoffverbrauch	123'352	145'309	TJ	18%
LNF	2005	Kraftstoffverbrauch	127'129	140'398	TJ	10%

Fahrzeug-kategorie	Jahr	Schadstoff	Verbrauch/Emissionen		Einheit	Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
			TREMOD	COPERT		
LNF	2006	Kraftstoffverbrauch	119'586	122'814	TJ	3%
LNF	2007	Kraftstoffverbrauch	121'600	124'460	TJ	2%
LNF	2008	Kraftstoffverbrauch	118'458	128'311	TJ	8%
LNF	2009	Kraftstoffverbrauch	117'021	130'042	TJ	11%
LNF	2010	Kraftstoffverbrauch	116'039	134'849	TJ	16%
LNF	2011	Kraftstoffverbrauch	116'342	132'439	TJ	14%
LNF	2012	Kraftstoffverbrauch	116'359	130'826	TJ	12%
LNF	2013	Kraftstoffverbrauch	115'668	127'541	TJ	10%
LNF	2000	CO2	8'233'309	10'929'583	t	33%
LNF	2001	CO2	8'586'684	10'721'053	t	25%
LNF	2002	CO2	8'939'485	10'829'250	t	21%
LNF	2003	CO2	9'018'247	10'561'690	t	17%
LNF	2004	CO2	9'089'355	10'698'635	t	18%
LNF	2005	CO2	9'359'032	10'339'013	t	10%
LNF	2006	CO2	8'782'134	9'046'413	t	3%
LNF	2007	CO2	8'925'306	9'169'111	t	3%
LNF	2008	CO2	8'701'791	9'454'433	t	9%
LNF	2009	CO2	8'599'736	9'582'668	t	11%
LNF	2010	CO2	8'527'461	9'937'802	t	17%
LNF	2011	CO2	8'551'435	9'760'657	t	14%
LNF	2012	CO2	8'552'925	9'642'592	t	13%
LNF	2013	CO2	8'504'444	9'400'471	t	11%
LNF	2000	HC	14'715	11'457	t	-22%
LNF	2001	HC	13'783	10'402	t	-25%
LNF	2002	HC	12'827	9'743	t	-24%
LNF	2003	HC	11'467	8'897	t	-22%
LNF	2004	HC	10'191	8'410	t	-17%
LNF	2005	HC	9'277	7'537	t	-19%
LNF	2006	HC	6'910	6'091	t	-12%
LNF	2007	HC	6'073	5'471	t	-10%
LNF	2008	HC	4'613	4'973	t	8%
LNF	2009	HC	3'976	4'614	t	16%
LNF	2010	HC	3'484	4'276	t	23%
LNF	2011	HC	3'085	3'658	t	19%
LNF	2012	HC	2'754	3'127	t	14%
LNF	2013	HC	2'460	2'653	t	8%
LNF	2000	NOx	53'943	53'474	t	-1%
LNF	2001	NOx	55'151	51'223	t	-7%
LNF	2002	NOx	56'116	50'794	t	-9%
LNF	2003	NOx	55'749	48'803	t	-12%
LNF	2004	NOx	55'464	48'782	t	-12%
LNF	2005	NOx	56'094	46'564	t	-17%

Tabelle 47: Kraftstoffverbrauch und Emissionen bei Verwendung der originalen Aktivitätsdaten von TREMOD und COPERT, 2000-2013.						
Fahrzeug-kategorie	Jahr	Schadstoff	Verbrauch/Emissionen		Einheit	Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
			TREMOD	COPERT		
LNF	2006	NOx	50'040	40'140	t	-20%
LNF	2007	NOx	48'942	38'952	t	-20%
LNF	2008	NOx	45'267	38'698	t	-15%
LNF	2009	NOx	43'434	38'067	t	-12%
LNF	2010	NOx	42'011	38'259	t	-9%
LNF	2011	NOx	41'338	36'602	t	-11%
LNF	2012	NOx	40'459	35'405	t	-12%
LNF	2013	NOx	39'682	33'761	t	-15%
LNF	2000	PM10 (Abgas)	6'047	7'272	t	20%
LNF	2001	PM10 (Abgas)	5'968	6'652	t	11%
LNF	2002	PM10 (Abgas)	5'685	6'365	t	12%
LNF	2003	PM10 (Abgas)	5'092	5'920	t	16%
LNF	2004	PM10 (Abgas)	4'808	5'734	t	19%
LNF	2005	PM10 (Abgas)	4'651	4'914	t	6%
LNF	2006	PM10 (Abgas)	3'836	4'102	t	7%
LNF	2007	PM10 (Abgas)	3'607	3'762	t	4%
LNF	2008	PM10 (Abgas)	3'134	3'541	t	13%
LNF	2009	PM10 (Abgas)	2'897	3'333	t	15%
LNF	2010	PM10 (Abgas)	2'699	3'195	t	18%
LNF	2011	PM10 (Abgas)	2'497	2'736	t	10%
LNF	2012	PM10 (Abgas)	2'235	2'354	t	5%
LNF	2013	PM10 (Abgas)	1'920	1'981	t	3%
SNF	2000	Kraftstoffverbrauch	512'390	664'024	TJ	30%
SNF	2001	Kraftstoffverbrauch	517'335	639'109	TJ	24%
SNF	2002	Kraftstoffverbrauch	519'059	613'347	TJ	18%
SNF	2003	Kraftstoffverbrauch	526'254	568'129	TJ	8%
SNF	2004	Kraftstoffverbrauch	533'236	557'923	TJ	5%
SNF	2005	Kraftstoffverbrauch	517'341	530'714	TJ	3%
SNF	2006	Kraftstoffverbrauch	541'462	535'364	TJ	-1%
SNF	2007	Kraftstoffverbrauch	557'359	531'264	TJ	-5%
SNF	2008	Kraftstoffverbrauch	551'912	512'548	TJ	-7%
SNF	2009	Kraftstoffverbrauch	510'386	499'746	TJ	-2%
SNF	2010	Kraftstoffverbrauch	534'596	514'145	TJ	-4%
SNF	2011	Kraftstoffverbrauch	550'118	516'599	TJ	-6%
SNF	2012	Kraftstoffverbrauch	535'853	521'348	TJ	-3%
SNF	2013	Kraftstoffverbrauch	539'760	515'065	TJ	-5%
SNF	2000	CO2	37'898'874	48'990'014	t	29%
SNF	2001	CO2	38'257'936	47'151'810	t	23%
SNF	2002	CO2	38'380'167	45'251'141	t	18%
SNF	2003	CO2	38'897'271	41'915'127	t	8%
SNF	2004	CO2	39'401'893	41'162'144	t	4%
SNF	2005	CO2	38'179'850	39'154'748	t	3%

Tabelle 47: Kraftstoffverbrauch und Emissionen bei Verwendung der originalen Aktivitätsdaten von TREMOD und COPERT, 2000-2013.						
Fahrzeugkategorie	Jahr	Schadstoff	Verbrauch/Emissionen		Einheit	Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
			TREMOD	COPERT		
SNF	2006	CO2	39'882'166	39'497'791	t	-1%
SNF	2007	CO2	41'034'714	39'195'274	t	-4%
SNF	2008	CO2	40'682'120	37'814'445	t	-7%
SNF	2009	CO2	37'647'373	36'869'980	t	-2%
SNF	2010	CO2	39'439'120	37'932'264	t	-4%
SNF	2011	CO2	40'594'850	38'113'357	t	-6%
SNF	2012	CO2	39'540'944	38'463'685	t	-3%
SNF	2013	CO2	39'846'277	38'000'196	t	-5%
SNF	2000	HC	22'026	30'807	t	40%
SNF	2001	HC	21'050	27'202	t	29%
SNF	2002	HC	20'163	24'519	t	22%
SNF	2003	HC	19'338	21'490	t	11%
SNF	2004	HC	18'687	19'976	t	7%
SNF	2005	HC	17'020	18'631	t	9%
SNF	2006	HC	16'317	17'688	t	8%
SNF	2007	HC	14'559	15'525	t	7%
SNF	2008	HC	11'399	13'242	t	16%
SNF	2009	HC	8'881	11'597	t	31%
SNF	2010	HC	7'750	9'561	t	23%
SNF	2011	HC	6'568	7'725	t	18%
SNF	2012	HC	5'387	6'271	t	16%
SNF	2013	HC	4'702	4'995	t	6%
SNF	2000	NOx	434'899	577'520	t	33%
SNF	2001	NOx	428'859	540'568	t	26%
SNF	2002	NOx	412'751	506'007	t	23%
SNF	2003	NOx	394'934	456'872	t	16%
SNF	2004	NOx	382'171	434'996	t	14%
SNF	2005	NOx	349'152	397'104	t	14%
SNF	2006	NOx	342'293	388'227	t	13%
SNF	2007	NOx	318'227	365'757	t	15%
SNF	2008	NOx	271'438	335'718	t	24%
SNF	2009	NOx	225'615	314'214	t	39%
SNF	2010	NOx	213'083	300'827	t	41%
SNF	2011	NOx	197'659	284'625	t	44%
SNF	2012	NOx	176'908	273'100	t	54%
SNF	2013	NOx	167'131	258'757	t	55%
SNF	2000	PM10 (Abgas)	10'380	17'557	t	69%
SNF	2001	PM10 (Abgas)	9'840	15'551	t	58%
SNF	2002	PM10 (Abgas)	9'195	14'048	t	53%
SNF	2003	PM10 (Abgas)	8'784	12'303	t	40%
SNF	2004	PM10 (Abgas)	8'538	11'365	t	33%
SNF	2005	PM10 (Abgas)	7'798	9'984	t	28%

Tabelle 47: Kraftstoffverbrauch und Emissionen bei Verwendung der originalen Aktivitätsdaten von TREMOD und COPERT, 2000-2013.						
Fahrzeug-kategorie	Jahr	Schadstoff	Verbrauch/Emissionen		Einheit	Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
			TREMOD	COPERT		
SNF	2006	PM10 (Abgas)	7'603	9'492	t	25%
SNF	2007	PM10 (Abgas)	6'930	8'407	t	21%
SNF	2008	PM10 (Abgas)	5'633	7'221	t	28%
SNF	2009	PM10 (Abgas)	4'522	6'388	t	41%
SNF	2010	PM10 (Abgas)	4'115	5'437	t	32%
SNF	2011	PM10 (Abgas)	3'672	4'567	t	24%
SNF	2012	PM10 (Abgas)	3'172	3'886	t	23%
SNF	2013	PM10 (Abgas)	2'912	3'273	t	12%
Bus	2000	Kraftstoffverbrauch	47'768	44'470	TJ	-7%
Bus	2001	Kraftstoffverbrauch	47'863	41'481	TJ	-13%
Bus	2002	Kraftstoffverbrauch	46'629	41'507	TJ	-11%
Bus	2003	Kraftstoffverbrauch	45'648	40'584	TJ	-11%
Bus	2004	Kraftstoffverbrauch	46'076	41'239	TJ	-10%
Bus	2005	Kraftstoffverbrauch	45'719	39'173	TJ	-14%
Bus	2006	Kraftstoffverbrauch	46'099	41'186	TJ	-11%
Bus	2007	Kraftstoffverbrauch	44'949	40'508	TJ	-10%
Bus	2008	Kraftstoffverbrauch	44'158	41'327	TJ	-6%
Bus	2009	Kraftstoffverbrauch	44'441	41'879	TJ	-6%
Bus	2010	Kraftstoffverbrauch	44'967	42'860	TJ	-5%
Bus	2011	Kraftstoffverbrauch	44'677	42'838	TJ	-4%
Bus	2012	Kraftstoffverbrauch	45'453	43'188	TJ	-5%
Bus	2013	Kraftstoffverbrauch	45'390	42'746	TJ	-6%
Bus	2000	CO2	3'533'170	3'280'873	t	-7%
Bus	2001	CO2	3'539'547	3'060'367	t	-14%
Bus	2002	CO2	3'447'823	3'062'252	t	-11%
Bus	2003	CO2	3'374'022	2'994'192	t	-11%
Bus	2004	CO2	3'404'639	3'042'496	t	-11%
Bus	2005	CO2	3'374'092	2'890'073	t	-14%
Bus	2006	CO2	3'381'558	3'012'169	t	-11%
Bus	2007	CO2	3'294'637	2'958'035	t	-10%
Bus	2008	CO2	3'239'469	3'017'624	t	-7%
Bus	2009	CO2	3'262'240	3'056'874	t	-6%
Bus	2010	CO2	3'301'557	3'130'858	t	-5%
Bus	2011	CO2	3'282'004	3'128'833	t	-5%
Bus	2012	CO2	3'339'859	3'153'638	t	-6%
Bus	2013	CO2	3'335'844	3'120'534	t	-6%
Bus	2000	HC	2'742	3'123	t	14%
Bus	2001	HC	2'581	2'779	t	8%
Bus	2002	HC	2'329	2'641	t	13%
Bus	2003	HC	2'105	2'457	t	17%
Bus	2004	HC	1'947	2'372	t	22%
Bus	2005	HC	1'809	2'230	t	23%

Tabelle 47: Kraftstoffverbrauch und Emissionen bei Verwendung der originalen Aktivitätsdaten von TREMOD und COPERT, 2000-2013.						
Fahrzeugkategorie	Jahr	Schadstoff	Verbrauch/Emissionen		Einheit	Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
			TREMOD	COPERT		
Bus	2006	HC	1'675	2'451	t	46%
Bus	2007	HC	1'480	2'261	t	53%
Bus	2008	HC	1'261	2'121	t	68%
Bus	2009	HC	1'126	1'961	t	74%
Bus	2010	HC	1'033	1'792	t	74%
Bus	2011	HC	914	1'612	t	76%
Bus	2012	HC	849	1'466	t	73%
Bus	2013	HC	760	1'311	t	73%
Bus	2000	NOx	41'947	39'486	t	-6%
Bus	2001	NOx	41'370	36'379	t	-12%
Bus	2002	NOx	39'348	35'555	t	-10%
Bus	2003	NOx	36'913	33'997	t	-8%
Bus	2004	NOx	36'245	33'817	t	-7%
Bus	2005	NOx	35'007	31'310	t	-11%
Bus	2006	NOx	33'932	31'804	t	-6%
Bus	2007	NOx	31'843	30'072	t	-6%
Bus	2008	NOx	29'528	29'566	t	0%
Bus	2009	NOx	28'102	28'720	t	2%
Bus	2010	NOx	27'014	28'187	t	4%
Bus	2011	NOx	25'486	26'968	t	6%
Bus	2012	NOx	24'782	26'095	t	5%
Bus	2013	NOx	23'490	24'859	t	6%
Bus	2000	PM10 (Abgas)	1'244	1'334	t	7%
Bus	2001	PM10 (Abgas)	1'164	1'178	t	1%
Bus	2002	PM10 (Abgas)	1'025	1'114	t	9%
Bus	2003	PM10 (Abgas)	917	1'031	t	12%
Bus	2004	PM10 (Abgas)	857	990	t	15%
Bus	2005	PM10 (Abgas)	794	879	t	11%
Bus	2006	PM10 (Abgas)	734	828	t	13%
Bus	2007	PM10 (Abgas)	653	738	t	13%
Bus	2008	PM10 (Abgas)	558	686	t	23%
Bus	2009	PM10 (Abgas)	501	626	t	25%
Bus	2010	PM10 (Abgas)	459	578	t	26%
Bus	2011	PM10 (Abgas)	410	515	t	26%
Bus	2012	PM10 (Abgas)	381	463	t	22%
Bus	2013	PM10 (Abgas)	344	410	t	19%
KR	2000	Kraftstoffverbrauch	20'037	33'946	TJ	69%
KR	2001	Kraftstoffverbrauch	20'465	31'909	TJ	56%
KR	2002	Kraftstoffverbrauch	21'303	31'813	TJ	49%
KR	2003	Kraftstoffverbrauch	21'174	30'291	TJ	43%
KR	2004	Kraftstoffverbrauch	21'670	29'758	TJ	37%
KR	2005	Kraftstoffverbrauch	21'986	28'013	TJ	27%

<b>Tabelle 47: Kraftstoffverbrauch und Emissionen bei Verwendung der originalen Aktivitätsdaten von TREMOD und COPERT, 2000-2013.</b>						
Fahrzeug-kategorie	Jahr	Schadstoff	Verbrauch/Emissionen		Einheit	Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
			TREMOD	COPERT		
KR	2006	Kraftstoffverbrauch	22'395	27'257	TJ	22%
KR	2007	Kraftstoffverbrauch	18'960	26'239	TJ	38%
KR	2008	Kraftstoffverbrauch	19'393	26'180	TJ	35%
KR	2009	Kraftstoffverbrauch	19'896	25'763	TJ	29%
KR	2010	Kraftstoffverbrauch	20'011	24'839	TJ	24%
KR	2011	Kraftstoffverbrauch	20'510	24'386	TJ	19%
KR	2012	Kraftstoffverbrauch	20'528	23'383	TJ	14%
KR	2013	Kraftstoffverbrauch	20'543	23'831	TJ	16%
KR	2000	CO2	1'442'680	2'460'176	t	71%
KR	2001	CO2	1'473'494	2'312'566	t	57%
KR	2002	CO2	1'533'840	2'305'639	t	50%
KR	2003	CO2	1'524'549	2'195'338	t	44%
KR	2004	CO2	1'560'271	2'156'679	t	38%
KR	2005	CO2	1'582'969	2'030'246	t	28%
KR	2006	CO2	1'612'416	1'975'456	t	23%
KR	2007	CO2	1'365'134	1'901'628	t	39%
KR	2008	CO2	1'396'282	1'897'376	t	36%
KR	2009	CO2	1'432'532	1'867'127	t	30%
KR	2010	CO2	1'440'802	1'800'187	t	25%
KR	2011	CO2	1'476'751	1'767'374	t	20%
KR	2012	CO2	1'478'015	1'694'625	t	15%
KR	2013	CO2	1'479'122	1'727'122	t	17%
KR	2000	HC	32'489	102'741	t	216%
KR	2001	HC	32'187	89'268	t	177%
KR	2002	HC	32'307	86'391	t	167%
KR	2003	HC	32'079	77'181	t	141%
KR	2004	HC	32'897	73'157	t	122%
KR	2005	HC	32'841	65'193	t	99%
KR	2006	HC	33'139	60'568	t	83%
KR	2007	HC	28'563	55'285	t	94%
KR	2008	HC	28'682	54'140	t	89%
KR	2009	HC	28'823	49'425	t	71%
KR	2010	HC	27'967	44'807	t	60%
KR	2011	HC	27'933	41'602	t	49%
KR	2012	HC	27'270	37'238	t	37%
KR	2013	HC	26'636	35'460	t	33%
KR	2000	NOx	3'722	4'782	t	28%
KR	2001	NOx	3'779	4'700	t	24%
KR	2002	NOx	3'857	4'784	t	24%
KR	2003	NOx	3'835	4'586	t	20%
KR	2004	NOx	3'872	4'501	t	16%
KR	2005	NOx	3'856	4'107	t	7%

**Tabelle 47: Kraftstoffverbrauch und Emissionen bei Verwendung der originalen Aktivitätsdaten von TREMOD und COPERT, 2000-2013.**

Fahrzeug-kategorie	Jahr	Schadstoff	Verbrauch/Emissionen		Einheit	Abweichung [COPERT/ TREMOD - 100%]
			TREMOD	COPERT		
KR	2006	NOx	3'839	4'025	t	5%
KR	2007	NOx	3'389	3'847	t	14%
KR	2008	NOx	3'352	3'799	t	13%
KR	2009	NOx	3'337	3'751	t	12%
KR	2010	NOx	3'271	3'643	t	11%
KR	2011	NOx	3'289	3'574	t	9%
KR	2012	NOx	3'225	3'434	t	6%
KR	2013	NOx	3'176	3'494	t	10%
KR	2000	PM10 (Abgas)	856	1'919	t	124%
KR	2001	PM10 (Abgas)	931	1'635	t	76%
KR	2002	PM10 (Abgas)	893	1'564	t	75%
KR	2003	PM10 (Abgas)	864	1'372	t	59%
KR	2004	PM10 (Abgas)	880	1'286	t	46%
KR	2005	PM10 (Abgas)	877	1'142	t	30%
KR	2006	PM10 (Abgas)	886	1'041	t	18%
KR	2007	PM10 (Abgas)	780	932	t	19%
KR	2008	PM10 (Abgas)	767	910	t	19%
KR	2009	PM10 (Abgas)	755	799	t	6%
KR	2010	PM10 (Abgas)	722	693	t	-4%
KR	2011	PM10 (Abgas)	719	615	t	-14%
KR	2012	PM10 (Abgas)	700	521	t	-26%
KR	2013	PM10 (Abgas)	686	472	t	-31%

### A2.3. Modellergebnisse bei Verwendung gleicher Aktivitätsdaten

**Tabelle 48: Kraftstoffverbrauch und Emissionen von PKW, LNF und SNF gemäß TREMOD und COPERT bei Verwendung der gleichen Aktivitätsdaten, 1990-2030 (Zehnjahresschritte).**

Fahrzeug-kategorie	Jahr	Schadstoff	Verbrauch/Emissionen		Einheit	Abweichung [CO-PERT/ TREMOD - 100%]
			TREMOD	COPERT		
PKW	1990	Kraftstoffverbrauch	1'457'550	1'431'430	TJ	-2%
PKW	2000	Kraftstoffverbrauch	1'550'082	1'490'987	TJ	-4%
PKW	2010	Kraftstoffverbrauch	1'499'287	1'726'854	TJ	15%
PKW	2020	Kraftstoffverbrauch	1'415'277	1'654'910	TJ	17%
PKW	2030	Kraftstoffverbrauch	1'251'546	1'458'616	TJ	17%
PKW	1990	CO2	105'392'320	103'501'625	t	-2%
PKW	2000	CO2	112'187'083	107'037'771	t	-5%
PKW	2010	CO2	108'776'702	124'408'880	t	14%
PKW	2020	CO2	102'436'611	119'537'130	t	17%
PKW	2030	CO2	88'561'580	105'225'941	t	19%



PKW	1990	HC	1'049'056	1'021'068	t	-3%
PKW	2000	HC	241'566	279'528	t	16%
PKW	2010	HC	86'207	92'836	t	8%
PKW	2020	HC	50'642	50'125	t	-1%
PKW	2030	HC	39'760	41'350	t	4%
PKW	1990	NOx	817'863	881'623	t	8%
PKW	2000	NOx	357'840	320'262	t	-11%
PKW	2010	NOx	221'713	213'123	t	-4%
PKW	2020	NOx	147'710	145'137	t	-2%
PKW	2030	NOx	74'682	98'612	t	32%
PKW	1990	PM10 (Abgas)	15'143	17'374	t	15%
PKW	2000	PM10 (Abgas)	14'305	11'051	t	-23%
PKW	2010	PM10 (Abgas)	7'395	10'043	t	36%
PKW	2020	PM10 (Abgas)	2'438	3'138	t	29%
PKW	2030	PM10 (Abgas)	1'476	1'482	t	0%
LNF	1990	Kraftstoffverbrauch	45'090	52'809	TJ	17%
LNF	2000	Kraftstoffverbrauch	96'704	115'281	TJ	19%
LNF	2010	Kraftstoffverbrauch	112'826	138'372	TJ	23%
LNF	2020	Kraftstoffverbrauch	113'960	144'842	TJ	27%
LNF	2030	Kraftstoffverbrauch	109'199	147'568	TJ	35%
LNF	1990	CO2	3'290'694	3'851'530	t	17%
LNF	2000	CO2	7'125'219	8'428'917	t	18%
LNF	2010	CO2	8'292'015	10'127'822	t	22%
LNF	2020	CO2	8'297'782	10'613'298	t	28%
LNF	2030	CO2	7'721'392	10'813'292	t	40%
LNF	1990	HC	30'618	16'390	t	-46%
LNF	2000	HC	11'603	11'085	t	-4%
LNF	2010	HC	3'050	4'077	t	34%
LNF	2020	HC	1'082	1'005	t	-7%
LNF	2030	HC	579	401	t	-31%
LNF	1990	NOx	28'776	35'877	t	25%
LNF	2000	NOx	45'611	45'264	t	-1%
LNF	2010	NOx	40'784	37'118	t	-9%
LNF	2020	NOx	26'668	27'275	t	2%
LNF	2030	NOx	11'191	16'799	t	50%
LNF	1990	PM10 (Abgas)	2'438	2'984	t	22%
LNF	2000	PM10 (Abgas)	5'100	5'392	t	6%
LNF	2010	PM10 (Abgas)	2'618	2'844	t	9%
LNF	2020	PM10 (Abgas)	703	746	t	6%
LNF	2030	PM10 (Abgas)	181	185	t	2%
SNF	1990	Kraftstoffverbrauch	349'542	329'543	TJ	-6%
SNF	2000	Kraftstoffverbrauch	497'798	468'438	TJ	-6%
SNF	2010	Kraftstoffverbrauch	519'472	469'266	TJ	-10%
SNF	2020	Kraftstoffverbrauch	565'143	528'535	TJ	-6%
SNF	2030	Kraftstoffverbrauch	563'564	587'113	TJ	4%
SNF	1990	CO2	25'866'104	24'174'235	t	-7%
SNF	2000	CO2	36'819'569	34'364'650	t	-7%

SNF	2010	CO2	38'323'401	34'422'595	t	-10%
SNF	2020	CO2	41'579'398	38'770'708	t	-7%
SNF	2030	CO2	41'459'042	43'067'111	t	4%
SNF	1990	HC	22'945	21'284	t	-7%
SNF	2000	HC	20'640	19'995	t	-3%
SNF	2010	HC	6'986	6'278	t	-10%
SNF	2020	HC	2'155	1'978	t	-8%
SNF	2030	HC	1'661	1'632	t	-2%
SNF	1990	NOx	336'281	314'159	t	-7%
SNF	2000	NOx	422'663	393'820	t	-7%
SNF	2010	NOx	203'118	246'400	t	21%
SNF	2020	NOx	45'857	50'135	t	9%
SNF	2030	NOx	21'630	13'532	t	-37%
SNF	1990	PM10 (Abgas)	12'953	12'187	t	-6%
SNF	2000	PM10 (Abgas)	9'946	11'463	t	15%
SNF	2010	PM10 (Abgas)	3'858	3'456	t	-10%
SNF	2020	PM10 (Abgas)	738	629	t	-15%
SNF	2030	PM10 (Abgas)	276	266	t	-4%

## Glossar

BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle Deutschland
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen Deutschland
BC	Black Carbon
BEV	Batterie-Elektrische Fahrzeuge (Battery-Electric Vehicles)
BMUB	Deutsches Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
Cd	Cadmium
CH <sub>4</sub>	Methan
CLRTAP	Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigungen (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution)
CNG	Erdgas (Compressed Natural Gas)
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
COPERT	Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport
DB	Deutsche Bahn
DPF	Dieselpartikelfilter
EC	Elemental Carbon
EGR	Exhaust Gas Recirculation (innermotorische Maßnahme zur NO <sub>x</sub> -Reduktion)
ETC/ACM	European Topic Centre for Air Pollution and Climate Change Mitigation
FCEV	Fuel cell electric vehicle
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
HC	Kohlenwasserstoffe
KR	Krafträder (Mopeds und Motorräder)
KST	Kraftstoff
LBus	Linienbusse, Busse des öffentlichen Verkehrs
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Flüssiggas (Liquefied Petroleum Gas)
LTO	Landing-Take-Off-Zyklus
MWV	Mineralölwirtschaftsverband e.V. (Deutschland)
N <sub>2</sub> O	Lachgas

NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NMHC	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
OM	Organische Partikel (organic particulate matter)
ORVR	On-board vapour recovery control
PAHs	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (polycyclic aromatic hydrocarbons; auch „PAKs“ genannt)
Pb	Blei
PEMS	Portable Emission Measurement System
PHEM	Passenger and Heavy Duty Vehicle Emission Modell der TU Graz (A)
PHEV	Plug-in Hybridfahrzeug (Plug-in-Hybrid-Electric Vehicle)
PM	Feinstaub (Particulate Matter)
PM10	Feinstaub mit Partikelgröße bis 10 µm
PN	Partikelanzahl (Particle Number)
PKW	Personenkraftwagen
POPs	Persistente/langlebige organische Schadstoffe (persistent organic pollutants)
PRIMES	„Price-Induced Market Equilibrium System“. Gleichgewichtsmodell für Energieangebot und –nachfrage in den 28 EU-Mitgliedsstaaten, entwickelt von der nationalen technischen Universität Athen
Probas	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme (UBA)
RBus	Reisebusse (Cars)
RVP	Reid Vapour Pressure
SCR	Selective Catalytic Reduction (DeNO <sub>x</sub> -Technologie)
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
SUV	Sports Utility Vehicle
TREMOD	Transport Emission Model
THG	Treibhausgas
TTW	Tank-to-wheel
UBA	Umweltbundesamt Deutschland
UNFCCC	Rahmenkonvention der Vereinigten Nationen über den Klimawandel (UN Framework Convention on Climate Change)
VDA	Verband der Automobilindustrie Deutschland
WTT	Well-to-tank

Zn

zGGW

Zink

Zulässiges Gesamtgewicht

## Literatur

- AGEB 2016:** Bilanzen 1990-2013. [<http://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2013.html>].
- Amann, M., Borken, J., Cofala, J., Klimont, Z. 2010:** Progress in the development of national baseline scenarios. Working Group on Strategies, Geneva, April 12-15, 2010.
- BAFU 2010:** Handbuch Emissionsfaktoren Strassenverkehr HBEFA. Version 3.1.
- BAG 2012:** Mautstatistik - Jahresbericht 2011. Bundesamt für Güterverkehr (BAG), Köln.
- BAG 2013:** Mautstatistik - Jahresbericht 2012.
- BAG 2014:** Marktbeobachtung Güterverkehr - Jahresbericht 2013.
- Barlow, I. S., Boulter, P. G. 2009:** Emission factors 2009: Report 2 - a review of the average-speed approach for estimating hot exhaust emissions. Transport Research Laboratory, Wokingham.
- Bellasio, R., Bianconi, R., Corda, G., Cucca, P. 2007:** Emission inventory for the road transport sector in Sardinia (Italy). Atmospheric Environment 41, 677–691.
- BMUB 2015:** Projektionsbericht der Bundesregierung 2015. Zusammenfassung der Ergebnisse.
- BMVBS 2013:** Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS).
- BMVI 2014a:** Verkehr in Zahlen 2014/2015.
- BMVI 2014b:** Verkehr in Zahlen 2014/2015.
- Burón, J. M., Aparicio, F., Izquierdo, Ó., Gómez, Á., López, I. 2005:** Estimation of the input data for the prediction of road transportation emissions in Spain from 2000 to 2010 considering several scenarios. Atmospheric Environment 39(30), 5585–5596.
- Burón, J. M., López, J. M., Aparicio, F., Martín, M. A., García, A. 2004:** Estimation of road transportation emissions in Spain from 1988 to 1999 using COPERT III program. Atmospheric Environment 38, 715–724.
- Cai, H., Xie, S. 2007:** Estimation of vehicular emission inventories in China from 1980 to 2005. Atmospheric Environment 41(39), 8963–8979.
- Chan, T. L., Ning, Z. 2005:** On-road remote sensing of diesel vehicle emissions measurement and emission factors estimation in Hong Kong. Atmospheric Environment 39(36), 6843–6856.
- Coelho, M. C., Fontes, T., Bandeira, J. M., Pereira, S. R., Tchepel, O., Dias, D., Sá, E., Amorim, J. H., Borrego, C. 2014:** Assessment of potential improvements on regional air quality

modelling related with implementation of a detailed methodology for traffic emission estimation. *Science of The Total Environment* 470–471, 127–137.

**Colberg, C., Tona, B., Stahel, W., Meier, M., Staehelin, J. 2005:** Comparison of a road traffic emission model (HBEFA) with emissions derived from measurements in the Gubrist road tunnel, Switzerland. *Atmospheric Environment* 39(26), 4703–4714.

**DIW 2005:** 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. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin.

**DLR, IFEU, LBST, DBFZ 2014a:** LNG als Alternativkraftstoff für den Antrieb von Schiffen und schweren Nutzfahrzeugen. Kurzstudie im Rahmen des Auftrags “Wissenschaftliche Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffe und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima” des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). [[http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-kurzstudie-lng.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-kurzstudie-lng.pdf?__blob=publicationFile)].

**DLR, IFEU, LBST, DBFZ 2014b:** Erneuerbare Energien im Verkehr - Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger. Studie im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) der Bundesregierung. [[http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf?__blob=publicationFile)].

**E3MLab 2013:** PRIMES Model 2013-2014. Detailed model description. [<http://www.e3mlab.ntua.gr/e3mlab/PRIMES%20Manual/The%20PRIMES%20MODEL%202013-2014.pdf>].

**EC 2014:** EU Energy, Transport and GHG Emissions. Trends to 2050. Reference scenario 2013. [[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/trends\\_to\\_2050\\_update\\_2013.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/trends_to_2050_update_2013.pdf)].

**EEA 2013:** European Union emission inventory report 1990–2011 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP), EEA Technical report No 10/2013.

**EEA 2014:** European Union emission inventory report 1990–2012 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP), EEA Technical report No 12/2014.

**EEA 2015a:** European Union emission inventory report 1990–2013 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP), EEA Technical report No 08/2015.

**EEA 2015b:** Monitoring of CO<sub>2</sub>-Emissions from vans - Regulation 510/2011. [<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/vans-3>].

**Ekström, M., Sjödin, Å., Andreasson, K. 2004:** Evaluation of the COPERT III emission model with on-road optical remote sensing measurements. *Atmospheric Environment* 38(38), 6631–6641.

**EMEP/EEA 2014:** EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013. Update Sept 2014: Exhaust emissions from road transport. European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP), European Environment Agency (EEA), Kopenhagen.

**Fraunhofer IWES, Fraunhofer IBP, IFEU, Stiftung Umweltenergierecht 2015:** Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr. Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in Hinblick auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Strombereich unter Berücksichtigung der europäischen Entwicklung. Ableitung von optimalen strukturellen Entwicklungspfaden für den Verkehrs- und Wärmesektor. Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. [[http://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes-neu/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/2015/Interaktion\\_EE-Strom\\_Waerme\\_Verkehr\\_Endbericht.pdf](http://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes-neu/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/2015/Interaktion_EE-Strom_Waerme_Verkehr_Endbericht.pdf)].

**Fre, R. D., Bruynseraede, P., Kretzschmar, J. G. 1994:** Air Pollution Measurements in Traffic Tunnels. *Environmental Health Perspectives* 102, 31.

**GIZ 2012:** Balancing Transport Greenhouse Gas Emissions in Cities – A Review of Practices in Germany.

**Hausberger, S., Rexeis, M., Zallinger, M., Luz, R. 2009:** Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3, Report No. I-20/2009 Haus-Em 33/08/679.

**Hausberger, S., Rodler, J., Sturm, P., Rexeis, M. 2003:** Emission factors for heavy-duty vehicles and validation by tunnel measurements. *Atmospheric Environment* 37(37), 5237–5245.

**Heusch-Boesefeldt 1994a:** Nutzfahrzeug-Jahresfahrleistungen 1990 (1986) auf den Straßen in der Bundesrepublik Deutschland. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr. Heusch Boesefeldt GmbH, Aachen.

**Heusch-Boesefeldt 1994b:** Ermittlung der Pkw-Jahresfahrleistungen 1990 und 1986 auf allen Straßen in der Bundesrepublik Deutschland. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr. Heusch Boesefeldt GmbH, Aachen.

**Heusch-Boesefeldt 1996:** Ermittlung der Pkw- und Nfz-Jahresfahrleistungen 1993 auf allen Straßen in der Bundesrepublik Deutschland. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr. Heusch Boesefeldt GmbH, Aachen.

**IER 2014:** Beschreibung der Minderungsmaßnahmen im Projekt PAREST. [[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/texte\\_48\\_2013\\_appelhans\\_e010\\_komplett\\_0\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/texte_48_2013_appelhans_e010_komplett_0_0.pdf)].

**IFEU 2009:** Aktualisierung des Modells TREMOD - Mobile Machinery (TREMOD-MM). Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg.

**IFEU 2012:** Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMOD, Version 5.3) für die Emissionsberichtserstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011). Endbericht. Institut



für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg. [[http://www.ifeu.de/verkehrund-umwelt/pdf/IFEU%282012%29\\_Bericht%20TREMOMOD%20FKZ%20360%2016%20037\\_121113.pdf](http://www.ifeu.de/verkehrund-umwelt/pdf/IFEU%282012%29_Bericht%20TREMOMOD%20FKZ%20360%2016%20037_121113.pdf)].

**IFEU 2014:** Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960- 2030“ (TREMOMOD) für die Emissionsberichterstattung. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg.

**IFEU, INFRAS 2010:** Ermittlung der Unsicherheiten der mit den Modellen TREMOMOD und TREMOMOD-MM berechneten Luftschadstoffemissionen des landgebundenen Verkehrs in Deutschland. UBA-Texte 26/2010. Heidelberg, Zürich und Bern. [<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ermittlung-unsicherheiten-den-modellen-tremod>].

**INFRAS 2004:** Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs, Version 2.1. CD-Rom und Grundlagenbericht. Schweizer Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Deutsches Umweltbundesamt (UBA), Österreichisches Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Österreichisches Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Umweltbundesamt Österreich, Bern, Berlin und Wien.

**INFRAS 2014:** HBEFA 3.2. Handbook of Emission Factors for Road Transport. [[www.hbefa.net](http://www.hbefa.net)].

**Intraplan 2014:** Verflechtungsprognose 2030. Zusammenfassung.

**IPCC 2006:** 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy.

**IVT 1993:** Fahrleistungserhebung 1990, Inlandsfahrleistungen und Kfz-Unfallrisiko in der Bundesrepublik Deutschland (alte Bundesländer). Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch-Gladbach.

**IVT 1994:** Fahrleistung und Unfallrisiko von Kraftfahrzeugen; Schlussbericht zur Fahrleistungserhebung 1993. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch-Gladbach.

**IVT 2004:** Fahrleistungserhebung 2002, Teil Begleitung und Auswertung, Band 1: Inländerfahrleistung 2002.

**Jansen, H., Denis, C. 1999:** A welfare cost assessment of various policy measures to reduce pollutant emissions from passenger road vehicles. Transportation Research Part D: Transport and Environment 4(6), 379–396.

**Joumard, R., André, M., Vidon, R., Tassel, P. 2003:** Characterizing real unit emissions for light duty goods vehicles. Atmospheric Environment 37(37), 5217–5225.

**Keller, M. 2014:** HBEFA – Version 3.2. Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs. Stand, Ausblick. Präsentation an der Infogruppensitzung Road des BAFU (Bundesamt für Umwelt), 15. Mai 2014.

- Kouridis, C., Gkatzoflias, D., Kioutsioukis, I., Pastorello, C., Dilara, P. 2010:** Uncertainty estimates and guidance for road transport emission calculations. [<http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC57352/uncertainty%20eur%20report%20final%20for%20print.pdf>].
- Kousoulidou, M., Ntziachristos, L., Gkeivanidis, S., Samaras, Z., Franco, V., Dilara, P. 2010:** Validation of the COPERT road emission inventory model with real-use data. [<http://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei19/session6/dilara.pdf>].
- Kousoulidou, M., Ntziachristos, L., Mellios, G., Samaras, Z. 2008:** Road-transport emission projections to 2020 in European urban environments. *Atmospheric Environment* 42(32), 7465–7475.
- Leinert, S., Hyde, B., Cotter, E. 2009:** Emission projections for NEC Gases – Ireland’s approach. 5th PEP Meeting, Vienna, 12 May 2009.
- Ligterink, N. E., De Lange, R. 2009:** Refined vehicle and driving-behaviour dependencies in the VERSIT+ emission model, Proceedings ETTAP 2009, Toulouse, France.
- Ligterink, N. E., De Lange, R., Tavasszy, L. A. 2012:** A velocity and payload dependent emission model for heavy-duty road freight transportation, *Transportation Research Part D*, 17, 487–491.
- LIPASTO 2015:** LIPASTO traffic emissions. [<http://www.lipasto.vtt.fi/indexe.htm>].
- Martini, G., Manfredi, U., Rocha, M., Marotta, A. 2012:** Review of the European Test Procedure for Evaporative Emissions: Main Issues and Proposed Solutions. Main Report. [[http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC77061/final\\_evap\\_report\\_online\\_version.pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC77061/final_evap_report_online_version.pdf)].
- Mellios, G., Hausberger, S., Keller, M., Samaras, C., Ntziachristos, L. 2011:** Parameterisation of fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions of passenger cars and light commercial vehicles for modelling purposes. [[http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/22474/1/co2\\_report\\_jrc\\_format\\_final2.pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/22474/1/co2_report_jrc_format_final2.pdf)].
- Mellios, G., Ntziachristos, L., Samaras, Z., White, L., Martini, G., Rose, K. 2012:** EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009, updated July 2012, Chapter 1.A.3.b.v Gasoline evaporation. [<http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1.a.3.b.v-gasoline-evaporation.pdf>].
- Mensink, C., De Vlieger, I., Nys, J. 2000:** An urban transport emission model for the Antwerp area. *Atmospheric Environment* 34(27), 4595–4602.
- Mock, P., German, J., Bandidavekar, A., Riemersma, I., Ligterink, N., Lambrecht, U. 2013:** From laboratory to road - A comparison of official and “real world” fuel consumption and CO<sub>2</sub> values for cars in Europe and the United States. International Council on Clean Transport-

tation (ICCT), in Collaboration with TNO, IFEU and Sidekick Project Support, Beijing, Berlin, Brussels, San Francisco and Washington. [[http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_LabToRoad\\_20130527.pdf](http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_LabToRoad_20130527.pdf)].

- Murena, F., Favale, G. 2007:** Continuous monitoring of carbon monoxide in a deep street canyon. *Atmospheric Environment* 41(12), 2620–2629.
- Ntziachristos, L., Gkatzoflias, D., Kouridis, C., Samaras, Z. 2009:** “COPERT: A European Road Transport Emission Inventory Model” in I. N. Athanasiadis, A. E. Rizzoli, P. A. Mitkas, and J. M. Gómez (eds.), *Information Technologies in Environmental Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 491–504. [[http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-88351-7\\_37](http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-88351-7_37)].
- Öko-Institut 2013:** Renewability II. Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs. [<http://www.oeko.de/oekodoc/1595/2012-451-de.pdf>].
- Öko-Institut, IZT, IER, IFEU, TNO, UBA 2014:** Weiterentwicklung von Prognosen für Luftschadstoffe unter Berücksichtigung von Klimastrategien. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. [[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_35\\_2014\\_komplett.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_35_2014_komplett.pdf)].
- Papadimitriou, G., Ntziachristos, L., Wüthrich, P., Notter, B., Fridell, E., Winnes, H., Styhre, L., Sjödin, A. 2013:** Transport data collection supporting the quantitative analysis of measures relating to transport and climate change (TRACCS). Final report. European Commission (EC), Directorate-General for Climate Action (DG CLIMA). [<http://traccs.emisia.com/>].
- Parra, R., Jiménez, P., Baldasano, J. M. 2006:** Development of the high spatial resolution EMI-CAT2000 emission model for air pollutants from the north-eastern Iberian Peninsula (Catalonia, Spain). *Environmental Pollution* 140(2), 200–219.
- Pujadas, M., Núñez, L., Plaza, J., Bezares, J. C., Fernández, J. M. 2004:** Comparison between experimental and calculated vehicle idle emission factors for Madrid fleet. *Science of The Total Environment* 334–335, 133–140.
- Rexeis, M., Hausberger, S., Kühlwein, J., Luz, R. 2013:** Update of Emission Factors for EURO 5 and EURO 6 vehicles for the HBEFA Version 3.2. Final report. Technische Universität Graz, Graz, Austria. [[http://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA32\\_EF\\_Euro\\_5\\_6\\_TUG.pdf](http://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA32_EF_Euro_5_6_TUG.pdf)].
- RWTÜV 1993:** Verdampfungs- und Verdunstungsemissionen. Rheinisch-Westfälischer TÜV (RWTÜV) im Auftrag des Schweizerischen Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- Saija, S., Romano, D. 2002:** A methodology for the estimation of road transport air emissions in urban areas of Italy. *Atmospheric Environment* 36(34), 5377–5383.
- Shengyang, S., Martin Schmied, Daniel Bongardt, Wüthrich, P., Urda Eichhorst 2014:** Modelling Energy Consumption and GHG Emissions of Road Transport in China Technical Paper on GIZ CRTEM/HBEFA - China Model.

- Smit, R., Keller, M., Ning, Z., Ntziachristos, L. 2014:** Literature Review Report of European Vehicle Emission Models. Thessaloniki.
- Smit, R., Ntziachristos, L., Boulter, P. 2010:** Validation of road vehicle and traffic emission models – A review and meta-analysis. *Atmospheric Environment* 44(25), 2943–2953.
- Smit, R., Poelman, M., Schrijver, J. 2008:** Improved road traffic emission inventories by adding mean speed distributions. *Atmospheric Environment* 42(5), 916–926.
- Smit, R., Smokers, R., Schoen, E. 2005:** VERSIT+ LD: Development of a new emission factor model for passenger cars linking real-world emissions to driving cycle characteristics, Proc. 14th Symposium Transport and Air Pollution, Graz, Austria, 177-186.
- Soylu, S. 2007:** Estimation of Turkish road transport emissions. *Energy Policy* 35(8), 4088–4094.
- TNO 2006:** Algemene PM10, NOx en NO2 Emissiefactoren voor Nederlandse Snelwegen (Concept), report TNO 06.OR.PT.029.1/RS, Smit, R. and others, Delft, The Netherlands.
- TNO 2013:** Investigations and real world emission performance of Euro 6 light-duty vehicles, report TNO 2013 R11891, Ligterink, N.E. and others, Delft, The Netherlands.
- TRL 1999:** Methodology for calculating transport emissions and energy consumption. [<http://www.transport-research.info/Upload/Documents/200310/meet.pdf>].
- TU Graz 2002:** Update of the Emission Functions for Heavy Duty Vehicles in the Handbook Emission Factors for Road Traffic. Technische Universität (TU) Graz im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie und des Umweltbundesamtes Österreich, Graz.
- TU Graz 2003:** Update der Emissionsfaktoren für schwere Nutzfahrzeuge nach EURO 3. Bericht Nr. FVT-45/03/ Haus Em 6790-30. Technische Universität (TU) Graz, Graz.
- TU Graz 2009:** Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3. Report Nr. I-20/2009 Haus-Em 33/08/679. Technische Universität (TU) Graz im Auftrag des Umweltbundesamtes Österreich, Lebensministerium Österreich, BMVIT Österreich, Joint Research Centre andERMES members, Graz.
- TÜV Rheinland 1994:** Abgas-Emissionsfaktoren von PKW in der Bundesrepublik Deutschland; - Abgasemissionen von Fahrzeugen der Baujahre 1986 bis 1990. UBA-Bericht 8/94. Umweltbundesamt (UBA), Berlin.
- TÜV Rheinland 1995:** Abgas-Emissionsfaktoren von Nutzfahrzeugen in der Bundesrepublik Deutschland - Abgasemissionsfaktoren von Dieselmotoren bis Baujahr 1990. Umweltbundesamt (UBA), Berlin.
- UBA 2014a:** Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2012. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2014. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

**UBA 2014b:** Vergleich der Emissionen einzelner Verkehrsträger im Personenverkehr - Bezugsjahr: 2012.

**Weilenmann, M., Mario Keller, Robert Alvarez 2010:** Fuel Consumption and CO<sub>2</sub>/Pollutant Emissions of Mobile Air Conditioning at Fleet Level – New Data and Model Comparison. Environ. Sci. Technol., 44(13):5277-82.

**Weilenmann, M., Robert Alvarez, J-Y Favez 2009:** Cold-start emissions of modern passenger cars at different low ambient temperatures and their evolution over vehicle legislation categories. Atmospheric Environment, 43, 996–1007.