

TEXTE

152/2023

Abschlussbericht

Neubewertung der Unsicherheiten der mit den zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen im Verkehrssektor verwendeten Parameter und Methoden

Abschlussbericht

von:

Michel Allekotte, Wolfram Knörr, Jan Kräck
ifeu, Heidelberg

Benedikt Notter, Bettina Schäppi, Martin Soini
INFRAS, Bern

Stefan Hausberger, Maurice Tödling, Doris Schadler
FVT, Graz

Herausgeber:
Umweltbundesamt

TEXTE 152/2023

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3720 51 502 0
FB001047

Abschlussbericht

Neubewertung der Unsicherheiten der mit den zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen im Verkehrssektor verwendeten Parameter und Methoden

Abschlussbericht

von

Michel Allekotte, Wolfram Knörr, Jan Kräck
ifeu, Heidelberg

Benedikt Notter, Bettina Schäppi, Martin Soini
INFRAS, Bern

Stefan Hausberger, Maurice Tödling, Doris Schadler
FVT, Graz

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu), INFRAS AG, FVT – Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH
Wilckensstraße 3, Sennweg 2, Inffeldgasse 19/III
69120 Heidelberg, 3012 Bern, 8010 Graz
Deutschland, Schweiz, Österreich

Abschlussdatum:

November 2022

Redaktion:

Fachgebiet V 1.6 Emissionssituation
Michael Kotzulla

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, November 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Neubewertung der Unsicherheiten der mit den zur Berechnung der Luftsadstoffemissionen im Verkehrssektor verwendeten Parameter und Methoden

Durch internationale Vorgaben für die Berichterstattung der Emissionen des Verkehrs durch das IPCC sind neben der Berechnung dieser Emissionen auch Angaben zu der Genauigkeit der Berechnungen anzugeben. Die hierfür im Umweltbundesamt (UBA) verwendeten Angaben gehen auf Analysen und Bewertungen aus dem Jahr 2009 zurück. In Anbetracht der seitdem eingetretenen Änderungen und den verschärften Debatten und Rahmenbedingen bzgl. der Verkehrsemissionen ist eine Aktualisierung der Berechnung der Unsicherheit unabdingbar. Die Bestimmung der Unsicherheiten müssen hierbei für Treibhausgase (N_2O , CH_4) und relevante Schadstoffemissionen (z. B. NO_x) durchgeführt werden.

Ziel des Projekts ist es daher, für die Quellgruppen „Ziviler Flugverkehr“ (1.A.3.a und 1.D.1.a) und „Straßenverkehr“ (1.A.3.b) für sämtliche relevanten Aktivitätsraten (Kraftstoffabsatz) und Emissionsfaktoren (u. a. CH_4 , NO_x etc.) aktuelle Unsicherheiten der berichteten Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren abzuleiten.

Für beide Quellgruppen werden differenzierte Modellierungsinstrumente verwendet. Im Bereich Straßenverkehr sind dies das Fahrzeugmodell PHEM von der TU Graz und FVT, das Emissionsmodell HBEFA von INFRAS sowie das Inventarmodell TREMOD von ifeu/UBA. Für den Flugverkehr wird das von ifeu entwickelte Modell TREMOD-AV eingesetzt.

Für sämtliche Eingangsgrößen der Modellverbünde werden die Unsicherheiten über Verteilungsfunktionen angegeben. Diese Eingangsgrößen werden innerhalb der definierten Bandbreiten in einer Monte-Carlo-Simulation variiert. Aus der Simulation ergeben sich schließlich die relativen Unsicherheiten der berichteten Werte (Kraftstoffabsätze und Emissionsfaktoren).

Abstract: Updating the uncertainty assessment of transport emission calculations

Due to international requirements for the reporting of transport emissions by the IPCC, an uncertainty assessment of the calculations must be provided in addition to the calculation of these emissions. The data used for this purpose issued by the Federal Environment Agency (UBA) goes back to assessments from 2009. Regarding the changes that have occurred since then and the intensified debates and framework conditions concerning transport emissions, an update of the uncertainty calculation is indispensable. The determination of uncertainties must be carried out for greenhouse gases (N_2O , CH_4) and relevant pollutant emissions (e.g. NO_x).

Therefore, the project target is the update of the uncertainty assessment of the reported activity rates and emission factors for all relevant activity rates (fuel sales) and emission factors (e.g. CH_4 , NO_x etc.) for the sectors "civil aviation" (1.A.3.a and 1.D.1.a) and "road transportation" (1.A.3.b).

Differentiated modelling tools are used for both sectors. In the area of road transportation, these are the vehicle model PHEM from TU Graz and FVT, the emission model HBEFA from INFRAS and the inventory model TREMOD from ifeu/UBA. For civil aviation, TREMOD-AV developed by ifeu is used.

For all input variables of the models, the uncertainties are specified via distribution functions. These input variables are varied within the defined bandwidths in a Monte Carlo simulation. Finally, the simulation yields the relative uncertainties of the reported values (fuel sales and emission factors).

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	12
Abkürzungsverzeichnis.....	17
Zusammenfassung.....	19
Summary	31
1 Einleitung.....	42
1.1 Aufgabenstellung	42
1.2 Vorgehen bei der Unsicherheitenanalyse.....	44
1.2.1 Grundlagen der Emissionsberechnung.....	44
1.2.2 Grundlagen der Unsicherheitsanalyse.....	45
1.2.2.1 Maß der Unsicherheit.....	45
1.2.2.2 Berechnung der Unsicherheiten der Eingangsdaten.....	45
1.2.2.3 Fehlerfortpflanzung	45
1.2.3 Vorgehen in der vorliegenden Studie	47
2 Straßenverkehr.....	49
2.1 Übersicht Methodik	49
2.1.1 Das Zentrale System der Emissionen (ZSE).....	49
2.1.2 PHEM	50
2.1.3 HBEFA.....	51
2.1.4 TREMOD	55
2.1.5 Unsicherheiten Straßenverkehr.....	56
2.2 Eingangs-Aktivitätsraten	57
2.2.1 Primäre Aktivitätsraten – Kraftstoffabsatz	57
2.2.2 Granulare Aktivitätsraten – Verkehrsmengen und Energieeffizienz	63
2.2.2.1 Inputdaten	63
2.2.2.2 Desaggregation im HBEFA-Flottenmodell	68
2.3 Schichtemissionsfaktoren	77
2.3.1 Schichtemissionsfaktoren regulierter Schadstoffe	77
2.3.1.1 Datengrundlage	78
2.3.1.2 Übersicht Einzelunsicherheiten je Fahrzeugkategorie	80
2.3.1.3 Mathematische Grundlagen	81
2.3.1.4 Bestimmung der Einzelunsicherheiten	86
2.3.1.5 Ergebnisse Pkw/LNF.....	92

2.3.1.6	Ergebnisse SNF	97
2.3.1.7	Schlussfolgerungen/Verbesserungspotential	99
2.3.2	Schichtemissionsfaktoren nicht-regulierter Schadstoffe	100
2.3.2.1	Bestimmung der Einzelunsicherheiten	100
2.3.2.2	Ergebnisse	101
2.3.3	Schichtemissionsfaktoren Verdunstungsemissionen	101
2.4	Unsicherheiten auf Ebene ZSE	102
2.4.1	Übersicht	102
2.4.2	Kraftstoffverbrauch	103
2.4.2.1	Unsicherheit des modellierten Verbrauchs auf Ebene Energieträger/Fahrzeugkategorie	103
2.4.2.2	Energiebilanzkorrektur	104
2.4.2.3	Unsicherheit Kraftstoffverbrauch im ZSE	106
2.4.2.4	Unsicherheit Aktivitätsraten Verdunstung im ZSE	110
2.4.3	Emissionsfaktoren	111
2.4.3.1	Regulierte Schadstoffe	111
2.4.3.2	Nicht-regulierte Schadstoffe	116
3	Flugverkehr	118
3.1	Übersicht Methodik	118
3.2	Eingangs-Aktivitätsraten	119
3.2.1	Primäre Aktivitätsraten – Kraftstoffabsatz	119
3.2.2	Granulare Aktivitätsraten – Verkehrsmengen	122
3.3	Schichtemissionsfaktoren	125
3.4	Unsicherheiten auf Ebene ZSE	132
3.4.1	Emissionsfaktoren	132
3.4.1.1	Emissionsfaktoren der LTO-Phase (Landing, Take-Off)	133
3.4.1.2	Emissionsfaktoren der CCD-Phase (Climb, Cruise, Descent)	137
3.4.2	Kraftstoffverbrauch	140
4	Fazit und Ausblicke	143
4.1	Straßenverkehr	143
4.2	Flugverkehr	149
5	Quellenverzeichnis	153
A	Anhang zu den Schichtemissionsfaktoren – Straßenverkehr	158
A.1	Ergebnisse regulierte Schadstoffe: Pkw/LNF N1 Klasse 1	158

A.1.1	Basis EF Diesel.....	158
A.1.2	Basis EF Benzin.....	159
A.2	Ergebnisse regulierte Schadstoffe: LNF N1 Klasse 2 und 3	161
A.2.1	Basis EF Diesel.....	161
A.2.2	Basis EF Benzin.....	164
A.3	Ergebnisse regulierte Schadstoffe: SNF und Busse – Basis EF	165
A.4	Ergebnisse nicht-regulierte Schadstoffe	167
B	Anhang zu den Ergebnissen – Flugverkehr.....	170
B.1	Verteilungsfunktionen der Emissionsfaktoren der LTO-Phase und deren Parameter	170
B.2	Verteilungsfunktionen der Emissionsfaktoren der CCD-Phase und deren Parameter	187
B.3	Energiebilanzkorrektur.....	204

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Unsicherheit des Absatzes Straßenverkehr pro Kraftstoffart ..	21
Abbildung 2:	Streuung der Unsicherheiten der Fahrleistungen nach Fahrzeugkategorie	22
Abbildung 3:	Streuung der Unsicherheiten der Kraftstoffverbräuche nach ZSE-Fahrzeugkategorie	23
Abbildung 4:	Streuung der Unsicherheiten der Antriebs-Emissionsfaktoren regulierter Schadstoffe nach Schadstoff und Fahrzeugkategorie	24
Abbildung 5:	Streuung der Unsicherheiten der Antriebs-Emissionsfaktoren nicht-regulierter Schadstoffe nach Schadstoff und Fahrzeugkategorie	25
Abbildung 6:	Generalisiertes Vorgehen bei der Unsicherheitsanalyse der Emissionen des Straßen- und Flugverkehrs.....	48
Abbildung 7:	Abstrahiertes Schema des Modellverbunds PHEM, HBEFA und TREMOD	50
Abbildung 8:	Schema des PHEM Modells	51
Abbildung 9:	Überblick über das Vorgehen bei der Unsicherheitsanalyse der Emissionen des Straßenverkehrs.....	57
Abbildung 10:	Inputs und Outputs des HBEFA-Flottenmodells.....	70
Abbildung 11:	Streuung der Unsicherheiten der Fahrleistungen nach Fahrzeugkategorie	71
Abbildung 12:	Streuung der Unsicherheiten der Fahrleistungen nach Fahrzeug – und Straßenkategorie	73
Abbildung 13:	Verteilung der Zufallswerte der Fahrleistungen aus den Monte-Carlo-Simulationen mit dem HBEFA-Flottenmodell: Beispiel der Pkw Otto Euro-4	74
Abbildung 14:	Streuung der Unsicherheiten der Laufleistungen nach Fahrzeugkategorie	75
Abbildung 15:	Streuung der Unsicherheit der Effizienz-Korrekturfaktoren nach Fahrzeugkategorie	76
Abbildung 16:	Streuung der Unsicherheiten des Bestandes nach Fahrzeugkategorie	77
Abbildung 17:	Abhängigkeit des Parameters t der Student-t-Verteilung von der Stichprobengröße.....	83
Abbildung 18:	Geschätzte repräsentative Messunsicherheit von NO_x als Funktion des Messwertes für alle Pkw Rollentests in der HBEFA Datenbasis	87
Abbildung 19:	Anteile der Einzelunsicherheiten an der mittels Fehlerfortpflanzung bestimmten Gesamtunsicherheit – Diesel-Pkw/LNF N1 I – NO_x – Innerorts (OG).....	94

Abbildung 20:	Anteile der Einzelunsicherheiten an der mittels Fehlerfortpflanzung bestimmten Gesamtunsicherheit – SNF und Busse – NO _x – Innerorts (OG)	98
Abbildung 21:	Vorgehen bei der Aggregation der Unsicherheiten auf ZSE-Niveau.....	103
Abbildung 22:	Streuung der Unsicherheiten der Kraftstoffverbräuche nach ZSE-Fahrzeugkategorie	107
Abbildung 23:	Streuung der Unsicherheiten der Kraftstoffverbräuche nach Energieträger	108
Abbildung 24:	Streuung der Unsicherheiten der Kraftstoffverbräuche nach ZSE-Fahrzeug- und Straßenkategorie	109
Abbildung 25:	Verteilung der Zufallswerte der Kraftstoffverbräuche aus den Monte-Carlo-Simulationen: Beispiel der schweren Nutzfahrzeuge Euro VI (d) mit Dieselantrieb.....	110
Abbildung 26:	Streuung der Unsicherheiten der Verdunstung nach ZSE-Fahrzeugkategorie	111
Abbildung 27:	Streuung der Unsicherheiten der Antriebs-Emissionsfaktoren regulierter Schadstoffe nach Schadstoff und Fahrzeugkategorie	112
Abbildung 28:	Streuung der Unsicherheiten der Antriebs-Emissionsfaktoren regulierter Schadstoffe nach Schadstoff, Fahrzeug- und Straßenkategorie	114
Abbildung 29:	Streuung der Unsicherheit der NO _x -Emissionsfaktoren von Diesel-Pkw nach Emissionsklasse	115
Abbildung 30:	Streuung der Unsicherheiten der Verdunstungs-Emissionsfaktoren der VOC (ohne Methan) nach Fahrzeugkategorie	116
Abbildung 31:	Streuung der Unsicherheiten der Antriebs-Emissionsfaktoren nicht-regulierter Schadstoffe nach Schadstoff und Fahrzeugkategorie	117
Abbildung 32:	Simulationsergebnisse für die spezifischen Emissionen an Black Carbon (BC) in der LTO-Phase internationaler Flüge mit Kerosin-Treibstoff.....	136
Abbildung 33:	Verteilung CH ₄ – LTO international Kerosin	170
Abbildung 34:	Verteilung CO – LTO international Kerosin.....	170
Abbildung 35:	Verteilung N ₂ O – LTO international Kerosin.....	171
Abbildung 36:	Verteilung NH ₃ – LTO international Kerosin	171
Abbildung 37:	Verteilung NMVOC – LTO international Kerosin	172
Abbildung 38:	Verteilung NO _x – LTO international Kerosin.....	172
Abbildung 39:	Verteilung PM – LTO international Kerosin	173
Abbildung 40:	Verteilung BC – LTO international Kerosin	173
Abbildung 41:	Verteilung SO ₂ – LTO international Kerosin.....	174
Abbildung 42:	Verteilung CH ₄ – LTO national Kerosin	174

Abbildung 43:	Verteilung CO – LTO national Kerosin	175
Abbildung 44:	Verteilung N ₂ O – LTO national Kerosin.....	175
Abbildung 45:	Verteilung NH ₃ – LTO national Kerosin.....	176
Abbildung 46:	Verteilung NMVOC – LTO national Kerosin	176
Abbildung 47:	Verteilung NO _x – LTO national Kerosin.....	177
Abbildung 48:	Verteilung PM – LTO national Kerosin.....	177
Abbildung 49:	Verteilung BC – LTO national Kerosin.....	178
Abbildung 50:	Verteilung SO ₂ – LTO national Kerosin	178
Abbildung 51:	Verteilung CH ₄ – LTO international Flugbenzin	179
Abbildung 52:	Verteilung CO – LTO international Flugbenzin	179
Abbildung 53:	Verteilung N ₂ O – LTO international Flugbenzin	180
Abbildung 54:	Verteilung NMVOC – LTO international Flugbenzin	180
Abbildung 55:	Verteilung NO _x – LTO international Flugbenzin	181
Abbildung 56:	Verteilung PM – LTO international Flugbenzin	181
Abbildung 57:	Verteilung BC – LTO international Flugbenzin.....	182
Abbildung 58:	Verteilung SO ₂ – LTO international Flugbenzin	182
Abbildung 59:	Verteilung CH ₄ – LTO national Flugbenzin.....	183
Abbildung 60:	Verteilung CO – LTO national Flugbenzin.....	183
Abbildung 61:	Verteilung N ₂ O – LTO national Flugbenzin	184
Abbildung 62:	Verteilung NMVOC – LTO national Flugbenzin.....	184
Abbildung 63:	Verteilung NO _x – LTO national Flugbenzin	185
Abbildung 64:	Verteilung PM – LTO national Flugbenzin	185
Abbildung 65:	Verteilung BC – LTO national Flugbenzin	186
Abbildung 66:	Verteilung SO ₂ – LTO national Flugbenzin	186
Abbildung 67:	Verteilung CH ₄ – CCD international Kerosin	187
Abbildung 68:	Verteilung CO – CCD international Kerosin	187
Abbildung 69:	Verteilung N ₂ O – CCD international Kerosin	188
Abbildung 70:	Verteilung NH ₃ – CCD international Kerosin	188
Abbildung 71:	Verteilung NMVOC – CCD international Kerosin.....	189
Abbildung 72:	Verteilung NO _x – CCD international Kerosin	189
Abbildung 73:	Verteilung PM – CCD international Kerosin	190
Abbildung 74:	Verteilung BC – CCD international Kerosin.....	190
Abbildung 75:	Verteilung SO ₂ – CCD international Kerosin	191
Abbildung 76:	Verteilung CH ₄ – CCD national Kerosin.....	191
Abbildung 77:	Verteilung CO – CCD national Kerosin.....	192
Abbildung 78:	Verteilung N ₂ O – CCD national Kerosin	192
Abbildung 79:	Verteilung NH ₃ – CCD national Kerosin	193
Abbildung 80:	Verteilung NMVOC – CCD national Kerosin.....	193
Abbildung 81:	Verteilung NO _x – CCD national Kerosin	194
Abbildung 82:	Verteilung PM – CCD national Kerosin	194
Abbildung 83:	Verteilung BC – CCD national Kerosin	195
Abbildung 84:	Verteilung SO ₂ – CCD national Kerosin.....	195
Abbildung 85:	Verteilung CH ₄ – CCD international Flugbenzin.....	196

Abbildung 86:	Verteilung CO – CCD international Flugbenzin.....	196
Abbildung 87:	Verteilung N ₂ O – CCD international Flugbenzin	197
Abbildung 88:	Verteilung NMVOC – CCD international Flugbenzin.....	197
Abbildung 89:	Verteilung NO _x – CCD international Flugbenzin.....	198
Abbildung 90:	Verteilung PM – CCD international Flugbenzin.....	198
Abbildung 91:	Verteilung BC – CCD international Flugbenzin	199
Abbildung 92:	Verteilung SO ₂ – CCD international Flugbenzin.....	199
Abbildung 93:	Verteilung CH ₄ – CCD national Flugbenzin	200
Abbildung 94:	Verteilung CO – CCD national Flugbenzin	200
Abbildung 95:	Verteilung N ₂ O – CCD national Flugbenzin.....	201
Abbildung 96:	Verteilung NMVOC – CCD national Flugbenzin	201
Abbildung 97:	Verteilung NO _x – CCD national Flugbenzin.....	202
Abbildung 98:	Verteilung PM – CCD national Flugbenzin.....	202
Abbildung 99:	Verteilung BC – CCD national Flugbenzin	203
Abbildung 100:	Verteilung SO ₂ – CCD national Flugbenzin	203
Abbildung 101:	Verteilung Kerosinverbrauch nach Energiebilanzkorrektur – LTO national.....	204
Abbildung 102:	Verteilung Kerosinverbrauch nach Energiebilanzkorrektur – CCD national	204
Abbildung 103:	Verteilung Kerosinverbrauch nach Energiebilanzkorrektur – LTO international.....	205
Abbildung 104:	Verteilung Kerosinverbrauch nach Energiebilanzkorrektur – CCD international	205

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anteil der Emissionsarten an den Straßenverkehrsemissionen in Deutschland, 2019	53
Tabelle 2:	Vergleich Verbrauch im Inland (Modellergebnis TREMOD) und Absatz (Energiebilanz) für Benzin und Diesel im Straßenverkehr 2019	56
Tabelle 3:	Heizwertbandbreite und relative Standardabweichung von Benzin und Diesel	60
Tabelle 4:	Absatz und Verbrauch von Mobilen Maschinen im Jahr 2019.	61
Tabelle 5:	Zuordnung des Absatzes auf den Straßenverkehr nach AG Energiebilanz	62
Tabelle 6:	Unsicherheit bzgl. der Zuordnung des Absatzes auf den Straßenverkehr	62
Tabelle 7:	Unsicherheiten der absoluten Bestände (Jahr 2019)	64
Tabelle 8:	Ober- und Untergrenze der Antriebstechnologieanteile pro Fahrzeugkategorie (Jahr 2019)	64
Tabelle 9:	Ober- und Untergrenze der Abgasnormenanteile pro Fahrzeugkategorie (Jahr 2019)	65

Tabelle 10:	Unsicherheiten der Fahrzeuge mit Dieselpartikelfilter (Jahr 2019).....	65
Tabelle 11:	Katalysatortechnologie bei Bussen und SNF Euro IV und V (Jahr 2019).....	66
Tabelle 12:	Relative Standardabweichung der Fahrleistung (Jahr 2019)....	66
Tabelle 13:	Unsicherheit der elektrischen Fahranteile von PHEV (Jahr 2019).....	67
Tabelle 14:	Anzahl durchschnittliche Fahrweite pro Startvorgang pro Fahrzeugkategorie	67
Tabelle 15:	Relative Standardabweichungen - Realverbrauchsfaktoren	68
Tabelle 16:	Input- und Output-Unsicherheiten HBEFA-Flottenmodell am Beispiel der Pkw Otto Euro-4.....	74
Tabelle 17:	Datengrundlage Otto-Pkw.....	79
Tabelle 18:	Datengrundlage Diesel-Pkw	79
Tabelle 19:	Datengrundlage SNF	80
Tabelle 20:	Relevante Einzelunsicherheiten der Basis Emissionsfaktoren (Basis-EF)	80
Tabelle 21:	Implizit enthaltene Unsicherheiten	81
Tabelle 22:	Unsicherheiten der Korrekturfaktoren und der Kaltstartzusatzemissionen.....	81
Tabelle 23:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-Pkw/LNF N1 I – NO _x	93
Tabelle 24:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 II – NO _x	95
Tabelle 25:	Unsicherheiten Korrekturfaktoren für Temperatur – Diesel-Pkw/LNF.....	96
Tabelle 26:	Unsicherheiten Korrekturfaktor für Alterung – Diesel-Pkw/LNF.....	96
Tabelle 27:	Unsicherheiten Korrekturfaktor für Alterung – Benzin-Pkw/LNF.....	96
Tabelle 28:	Unsicherheiten des Kaltstartzusatzfaktors [g/Start] – Diesel-Pkw/LNF	96
Tabelle 29:	Unsicherheiten des Kaltstartzusatzfaktors [g/Start] – Benzin-Pkw/LNF	97
Tabelle 30:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – SNF und Busse – NO _x	97
Tabelle 31:	Unsicherheiten des Korrekturfaktors für die Alterung – SZ – RB.....	98
Tabelle 32:	Unsicherheiten des Korrekturfaktors für die Alterung – VL – SB	99
Tabelle 33:	„Precision rating“ gem. EMEP/EEA und Verwendete Unsicherheitsparameter.....	100
Tabelle 34:	Unsicherheiten Verdunstungs-Emissionsfaktoren	101

Tabelle 35:	Unsicherheiten des modellierten Kraftstoffverbrauchs auf Ebene Energieträger/Fahrzeugkategorie	104
Tabelle 36:	Unsicherheiten der Eingangsgrößen zur Ermittlung des EBK _{Otto}	105
Tabelle 37:	Unsicherheiten der Eingangsgrößen zur Ermittlung des EBK _{Diesel,Bus&SNF}	106
Tabelle 38:	Variationskoeffizienten (CV) der Basis-Emissionsfaktoren und Korrekturfaktoren für Stickoxid-Emissionen von Diesel-Pkw auf der Autobahn.....	113
Tabelle 39:	Heizwertbandbreite von Kerosin und Flugbenzin	121
Tabelle 40:	Absatz gesamt und Verbrauch Militär von Kerosin und Flugbenzin im Jahr 2019	122
Tabelle 41:	Relative Standardabweichungen - Großkreisdistanz.....	123
Tabelle 42:	Relative Standardabweichungen - Umweg	124
Tabelle 43:	Relative Standardabweichungen – Taxi-Zeiten	125
Tabelle 44:	Anzahl berücksichtiger Turbinen für Unsicherheitenanalyse der Messungen	126
Tabelle 45:	Relative Standardabweichungen und Gewichtungsfaktoren der Messwerte von HC, CO, NO _x und PM	127
Tabelle 46:	Relative Standardabweichungen der Typenerfassung von Verbrauch, HC, CO, NO _x und PM generischer Flugzeugtypen	128
Tabelle 47:	Relative Standardabweichungen der Typenerfassung von Verbrauch, HC, CO, NO _x und PM zugeordneter Flugzeugtypen	128
Tabelle 48:	Relative Standardabweichungen der Typenerfassung von Verbrauch, HC, CO, NO _x und PM aus der Turbinendatenbank abgeleiteter Flugzeugtypen.....	129
Tabelle 49:	Relative Standardabweichungen auf der Ebene „Modellierung – Real“	130
Tabelle 50:	Abhängige Emissionen und ihre Bezugsgröße in TREMOD-AV	130
Tabelle 51:	Bandbreiten von CH ₄ pro Flugphase und Kraftstoffart	132
Tabelle 52:	Energiespezifische Emissionsfaktoren internationaler Flüge in der LTO-Phase und deren relativen Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervall)	134
Tabelle 53:	Energiespezifische Emissionsfaktoren nationaler Flüge in der LTO-Phase und deren relativen Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervall)	135
Tabelle 54:	Zugeordnete Verteilungsfunktionen der Ergebnisse der LTO-Phase aus der Monte-Carlo-Simulation.....	137
Tabelle 55:	Energiespezifische Emissionsfaktoren internationaler Flüge in der CCD-Phase und deren relativen Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervall)	138

Tabelle 56:	Energiespezifische Emissionsfaktoren nationaler Flüge in der CCD-Phase und deren relativen Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervall)	139
Tabelle 57:	Zugeordnete Verteilungsfunktionen der Ergebnisse der CCD-Phase aus der Monte-Carlo-Simulation.....	140
Tabelle 58:	Kerosinverbrauch der nationalen und internationalen Flüge und deren relative Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervall) in den Flugphasen CCD und LTO.....	141
Tabelle 59:	Flugbenzinverbrauch der nationalen und internationalen Flüge und deren relative Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervall) in den Flugphasen CCD und LTO.....	141
Tabelle 60:	Zugeordnete Verteilungsfunktionen der Ergebnisse Treibstoffverbrauchs aus der Monte-Carlo-Simulation	141
Tabelle 61:	Bandbreite der Unsicherheiten der Splitfaktoren aus der Monte-Carlo-Simulation.....	142
Tabelle 62:	Bandbreite der Unsicherheiten der LTO-Anteile am Verbrauch getrennt nach Relation	142
Tabelle 63:	Vergleich der Unsicherheit der ZSE-Aktivitätsraten für Diesel- und Otto-Pkw und Diesel-SNF (bis Euro-4/IV) mit dem Vorgängerbericht.....	146
Tabelle 64:	Vergleich der Unsicherheit der ZSE-NO _x -Emissionsfaktoren für Diesel- und Otto-Pkw (bis Euro-4/IV) mit dem Vorgängerbericht.....	147
Tabelle 65:	Emissionsfaktoren und Energieverbrauch sowie deren relativen Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervall) – Kerosin.....	150
Tabelle 66:	Auswirkung der verwendeten Methode auf Energieverbrauch Flugverkehr Kerosin.....	151
Tabelle 67:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel – CO.....	158
Tabelle 68:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel – HC.....	158
Tabelle 69:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel – PM.....	159
Tabelle 70:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin – NO _x	159
Tabelle 71:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin – CO.....	159
Tabelle 72:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin – HC.....	160
Tabelle 73:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin – PM.....	160
Tabelle 74:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 II – CO	161
Tabelle 75:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 II – HC	161
Tabelle 76:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 II – PM.....	161
Tabelle 77:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 III – NO _x	162

Tabelle 78:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 III –	
	CO	162
Tabelle 79:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 III –	
	HC	163
Tabelle 80:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 III –	
	PM.....	163
Tabelle 81:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin-LNF N1 II und	
	N1 III – NO _x	164
Tabelle 82:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin-LNF N1 II und	
	N1 III – CO	164
Tabelle 83:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin-LNF N1 II und	
	N1 III – HC	164
Tabelle 84:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin-LNF N1 II und	
	N1 III – PM	165
Tabelle 85:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – SNF und Busse –	
	CO	165
Tabelle 86:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – SNF und Busse –	
	HC	166
Tabelle 87:	Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – SNF und Busse –	
	PM.....	166
Tabelle 88:	Unsicherheiten NH ₃ und N ₂ O-Schichtemissionsfaktoren für Pkw	
	und LNF Diesel Euro-5 und -6	167
Tabelle 89:	Unsicherheiten NH ₃ und N ₂ O-Schichtemissionsfaktoren für alle	
	Fahrzeugschichten außer Pkw und LNF Diesel Euro-5 und -6	167
Tabelle 90:	Unsicherheiten CH ₄ - und NMVOC-Anteile an den Gesamt-	
	Kohlenwasserstoffen (HC)	168
Tabelle 91:	Unsicherheiten der Anteile Black Carbon (BC) an PM2.5.....	168
Tabelle 92:	Unsicherheiten der Schwefelgehalte nach Kraftstoffart.....	169

Abkürzungsverzeichnis

AGR	Abgasrückführung
AR	Aktivitätsrate
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BC	Black Carbon (Ruß)
CCD	Climb, Cruise and Descent (Steigflug, Reiseflug und Sinkflug)
CH₄	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CV	Variationskoeffizient
DBEFA	Datenbank zum HBEFA
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
DK	Dieselkraftstoff
EEA	European Environment Agency (Europäische Umweltagentur)
EF	Emissionsfaktor
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
GKD	Großkreisdistanz
HBEFA	Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
HC	Flüchtige organische Substanzen aus Kohlenwasserstoffen
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
KF	Korrekturfaktor
Kfz	Kraftfahrzeug
KR	Kraftrad
Lkw	Lastkraftwagen
LMW	Leichter Motorenwagen (Pkw und LNF)
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug (bis 3,5 Tonnen)
LOD	Limit-Of-Detection
LTO	Landing and Take Off
LV	Leichtverkehr (Pkw, motorisierte Zweiräder, leichte Nutzfahrzeuge)
ME	Messunsicherheit
mKr	Masse Kraftstoff
MR	Motorrad
MTOW	Maximum Take-off Weight (Höchstabfluggewicht)
n. A.	Nicht anwendbar
N₂O	Lachgas
NH₃	Ammoniak
NMVOC	Non-methane volatile organic compounds (Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan)

NO_x	Stickoxide
OG	Obergrenze
PEMS	Portable emissions measurement system (Mobiles Emissionsmessgerät)
PHEM	Passenger Car and Heavy Duty Emission Model (Emissionsmodell für Pkw und SNF)
PHEV	Plugin-Hybrid (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
Pkw	Personenkraftwagen
PM₁₀	Partikel <10 µm
PM_{2,5}	Partikel <2,5 µm
RB	Reisebusse
RDE	Real Driving Emissions (Emissionen im praktischen Fahrbetrieb)
SB	Stadtbusse
SCR	Selective Catalytic Reduction (Selektive katalytische Reduktion)
SNF	Schweres Nutzfahrzeug (ab 3,5 Tonnen) (=Sammelbegriff für Lkw und SZ)
SO₂	Schwefeldioxid
SZ	Sattelzugmaschinen
Sst	Serienstreuung
SV	Schwerverkehr (schwere Nutzfahrzeuge, Busse)
TREMOD	Transport Emission Model
TS	Traffic Situation (HBEFA Verkehrssituation)
TSP	Total Suspended Particles (Gesamtstaub)
TUG	Technische Universität Graz
U	Unsicherheitsbereich (95%-Konfidenzintervall)
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
UG	Untergrenze
U_{max}	Obere Schranke (95%-Konfidenzintervall)
U_{min}	Untere Schranke (95%-Konfidenzintervall)
VB	Verbrauch (Kraftstoff/Energie)
VL	Verteiler-Lkw
WH	Wiederholbarkeit
ZSE	Zentrales System Emissionen

Zusammenfassung

Durch internationale Vorgaben für die Berichterstattung der Emissionen des Verkehrs durch das IPCC sind neben der Berechnung dieser Emissionen auch Angaben zu der Genauigkeit der Berechnungen anzugeben. Die hierfür im Umweltbundesamt verwendeten Angaben gehen auf Analysen und Bewertungen aus dem Jahr 2009 zurück (Knörr et al. 2009). In Anbetracht der seitdem eingetretenen Änderungen (z. B. Effizienz, Richtlinien) und den verschärften Debatten und Rahmenbedingungen bzgl. der Verkehrsemissionen (z. B. Bundes-Klimaschutzgesetz) ist eine Aktualisierung der Berechnung der Genauigkeit/Unsicherheit unabdingbar. Die Bestimmung der Unsicherheiten müssen hierbei für Treibhausgase und relevante Schadstoffemissionen durchgeführt werden.

Ziel des Projekts war es daher, für die Quellgruppen „Ziviler Flugverkehr“ (1.A.3.a und 1.D.1.a) und „Straßenverkehr“ (1.A.3.b) für sämtliche relevanten Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren aktuelle Unsicherheiten abzuleiten und in das der Emissionsberichterstattung zugrundeliegende Datenbanksystem Zentrale System Emissionen (ZSE) zu überführen. Grundlage für die Berichterstattung ist das Transport Emission Model (TREMOD) des UBA.

Mit dem „Straßenverkehr“ und dem „Flugverkehr“ werden Quellgruppen mit hohen Beiträgen zu den Treibhausgasemissionen betrachtet, für die differenzierte Modellierungsinstrumente verwendet werden. Im Bereich Straßenverkehr sind dies das Fahrzeugmodell PHEM von der TU Graz und FVT, das Emissionsmodell „Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr“ (HBEFA) von INFRAS sowie das Inventarmodell TREMOD von ifeu/UBA. Für den Flugverkehr wird das von ifeu entwickelte Modell TREMOD Aviation (TREMOD-AV) eingesetzt. Für die automatisierte Übergabe in das ZSE existieren bereits Schnittstellen für die Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren für den Straßen- und Flugverkehr aus TREMOD. Diese sollen nun ergänzt werden mit den Angaben für die Unsicherheiten der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren.

Basis zur Bestimmung der absoluten Emissionsmengen des Verkehrs stellen die primären Aktivitätsraten der jeweiligen Quellgruppe dar. Als primäre Aktivitätsrate versteht man die jährlichen Kraftstoffliefermengen in Deutschland. Die primären Aktivitätsraten der Quellgruppen „Ziviler Flugverkehr“ und „Straßenverkehr“ werden aus den von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen erstellten Energiebilanzen für Deutschland entnommen.

Innerhalb TREMOD bzw. TREMOD-AV folgt eine Aufteilung der primären Aktivitätsraten. Die Aufteilung ist nach der Differenzierung im ZSE vorzunehmen. Das ZSE bzw. der Nationale Inventarbericht sieht die folgende Differenzierung vor:

► Straßenverkehr:

- Kraftstoffart: Diesel, Biodiesel, Erdgas, Biogas, Benzin, Ethanol, LPG, LNG
- Fahrzeugkategorie: Bus, LNF, Moped, Motorrad, Pkw, SNF
- Abgasnorm: Konventionell, Euro 1/I bis Euro 5/V, Euro 6/VI (ab, c, d, d-TEMP)
- Straßenkategorie: Autobahn, außerorts, innerorts
- Emissionsart: Antrieb, Verdunstung

► Ziviler Flugverkehr:

- Kraftstoffart: Kerosin, Flugbenzin
- Zielflughafen: national, international

- Flugphase: LTO, CCD

Im Falle des Straßenverkehrs erfolgt die Aufteilung sehr granular, auf Basis hochauflöster Fahrleistungs- und Fahrzeugbestandsdaten, spezifischer Verbräuche, Emissionsfaktoren etc. Beim Flugverkehr dienen insb. die Flugbewegungen und spezifischen Emissionen der Flugzeugtypen als Differenzierungsgröße. Für die Berechnung der im Rahmen der nationalen Berichterstattung veröffentlichten Emissionen werden diese sehr spezifischen Aktivitätsdaten wieder auf den im ZSE hinterlegten Detailierungsgrad aufsummiert.

Neben der Aufteilung der primären Aktivitätsraten in die ZSE-Differenzierung erfolgt in TREMOD zudem die Berechnung der Emissionsfaktoren. Anhand der primären Aktivitätsraten und der (kraftstoffspezifischen) Emissionsfaktoren können schlussendlich die Gesamtemissionen der beiden betrachteten Quellgruppen bestimmt werden.

Die folgenden Emissionen werden in die ZSE-Differenzierung überführt:

- ▶ Treibhausgase¹: CH₄, N₂O
- ▶ Schadstoffe: NH₃, BC, PM_{2,5}, PM₁₀, TSP, NMVOC, NO_x, SO₂, CO

Zur Ermittlung der Unsicherheiten der primären Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren in der ZSE-Differenzierung sind in einem ersten Schritt die Unsicherheiten der aus anderen Datenquellen in TREMOD und TREMOD-AV übernommenen primären Aktivitätsraten, Verkehrsmengen und Emissionsfaktoren zu bestimmen. Ausgehend von dieser Analyse sind die Unsicherheiten der in TREMOD und TREMOD-AV erzeugten Aufteilung der primären Aktivitätsraten und berechneten Emissionsfaktoren abzuleiten. Bezugsjahr für die Ermittlung der relativen Unsicherheiten stellt das Jahr 2019 dar.

Es werden für die ermittelten Unsicherheiten folgende Parameter ausgewiesen:

- ▶ obere und untere Schranken: U_{min} und U_{max}, in Prozent [%]
- ▶ Art der Verteilung: normal, log-normal, Dreiecksverteilung, Gleichverteilung

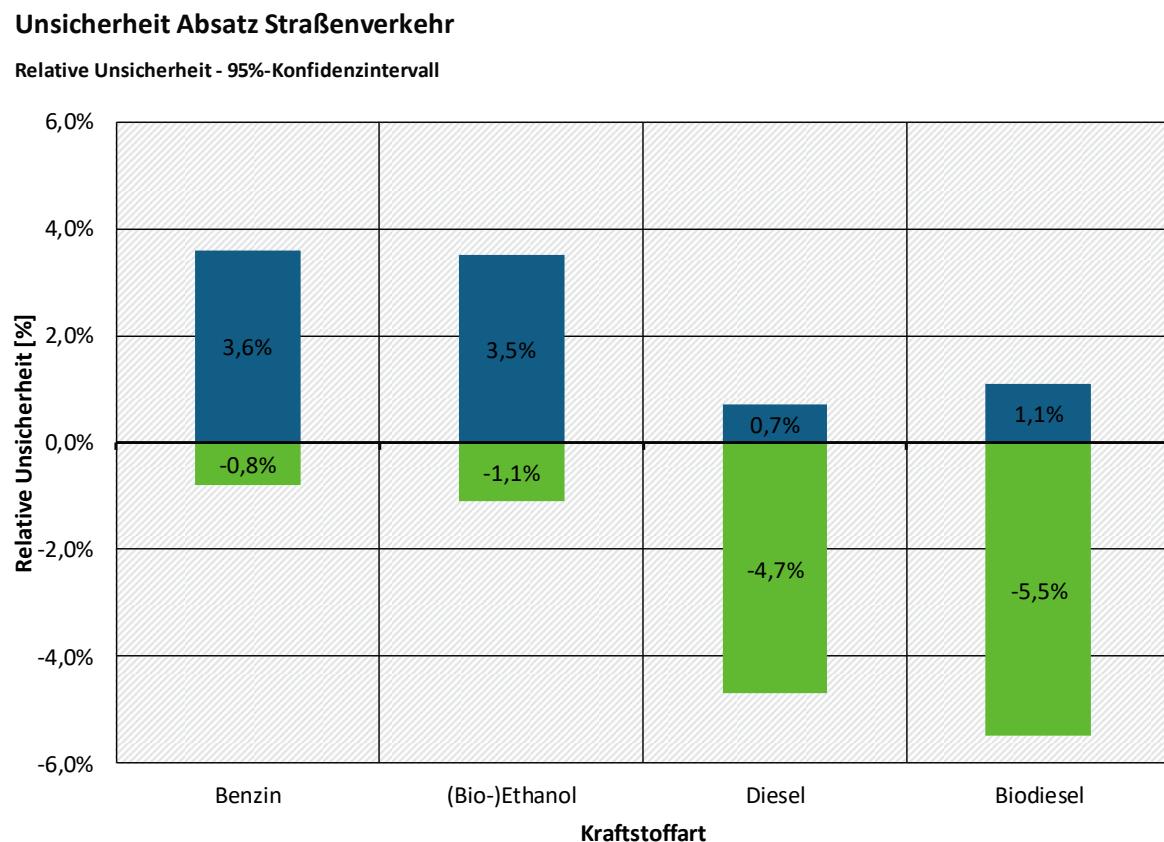
Straßenverkehr

Sowohl für die primären Aktivitätsraten pro Kraftstoffart als auch für die Emissionsfaktoren liegen nach der o. g. Differenzierung für den Straßenverkehr Unsicherheiten vor. Diese Unsicherheiten entstehen auf unterschiedlichen Ebenen und sind an den jeweiligen Stellen im Modellverbund zu bestimmen.

Die Absätze (primäre Aktivitätsraten) sind insb. über (AG Energiebilanzen o.J.) verfügbar. Aufgrund der statistischen Erhebungsmethode ist hier eine hohe Genauigkeit gegeben. Je nach Kraftstoffart liegt die relative Unsicherheit im Bereich von maximal 5,5 %, siehe Abbildung 1.

¹ Die Bestimmung der Unsicherheiten von CO₂ ist nicht Gegenstand des Projekts.

Abbildung 1: Unsicherheit des Absatzes Straßenverkehr pro Kraftstoffart



Quelle: eigene Darstellung, ifeu.

Wie oben beschrieben, hängen die aus der motorischen Verbrennung resultierenden Emissionen von einigen Faktoren (z. B. Fahrzeugkategorie, Abgasnorm etc.) ab. Dadurch sind auch die Absatzmengen in der angeführten Differenzierung aufzuteilen, um über die dazugehörigen Emissionsfaktoren die absoluten Emissionen bestimmen zu können. Für diese Aufteilung sind zum einen die Verkehrsmengen (granularen Aktivitätsraten) und zum anderen die spezifischen Verbräuche der Fahrzeuge relevant.

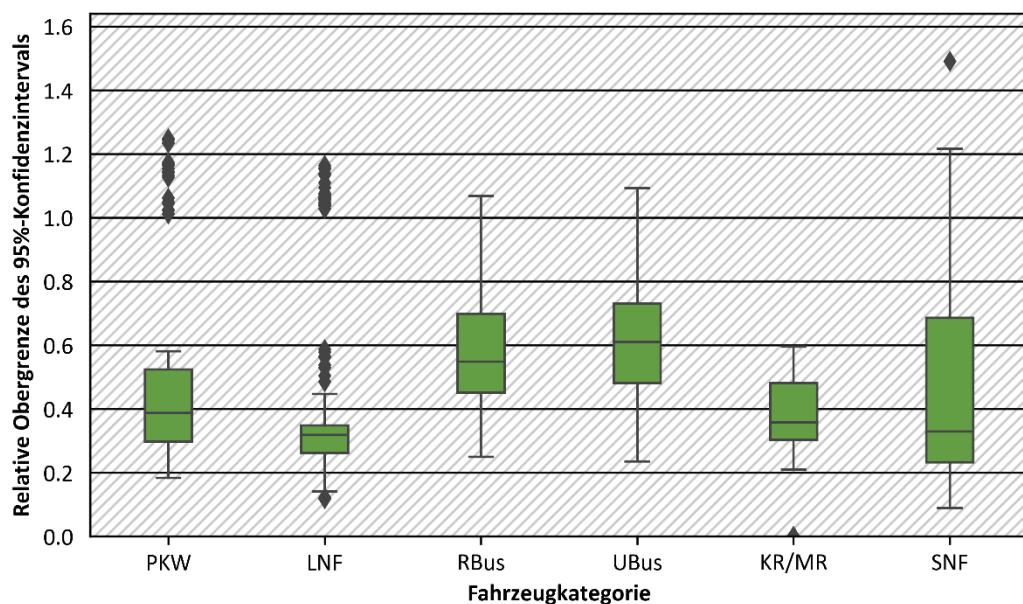
Die Unsicherheiten der Verkehrsmengen werden hier insbesondere über die Unsicherheiten der Bestände (absolute Bestände, Anteile Antriebstechnologien, Abgasnormen, Partikelfilter und Katalysatoren), der Fahrleistungen sowie der Verkehrssituationen und Energieeffizienzkorrekturen ermittelt. Bei den absoluten Beständen pro Fahrzeugkategorie (Pkw, LNF etc.) lässt sich feststellen, dass geringe Unsicherheiten bestehen, da hier eine gute statistische Grundlage vorliegt. Die Unsicherheit liegt hier bei unter einem Prozent. Bei der Aufteilung der absoluten Bestände auf die Fahrzeugschichten (z. B. Pkw Otto Euro 6d, Sattelzugmaschine Euro V EGR etc.) bestehen zwar höhere Unsicherheiten bestehen, gerade die Bestände von Fahrzeugschichten mit einem hohen Anteil am Gesamtbestand weisen aber eine geringe relative Unsicherheit auf.

Im Gegensatz zu den Beständen werden Fahrleistungen nicht umfassend und zeitnah statistisch erhoben. Dadurch sind die Unsicherheiten deutlich höher. Die Gesamtfahrleistung von Pkw weist bspw. eine relative Unsicherheit von ca. 20 % auf. Der relative Unsicherheitsbereich liegt hier je nach Straßenkategorie bei ca. ± 12 bis ± 26 %. Demgegenüber können SNF, die ebenfalls eine hohe Relevanz für die Emissionen und Kraftstoffverbräuche haben, mit einer höheren Genauigkeit angegeben werden, denn hier ist die Fahrleistung von SNF >7,5 auf Autobahnen

und Bundesstraßen durch die Mautstatistik gegeben. Die relative Unsicherheit der Gesamtfahrleistung beträgt 6 %, wobei abseits der Autobahn eine Unsicherheit von 10 bis 12 % vorliegt.

Verknüpft man die Unsicherheiten bzgl. der Flotten und Fahrleistungen über das Flottenmodell des HBEFAs, so erhält man die Unsicherheiten der Fahrleistungen aus Abbildung 2. Hier sieht man pro Fahrzeugkategorie die Obergrenzen der relativen Unsicherheit für die Fahrleistungen pro Subsegment (z. B. Pkw Euro 4 Diesel) und Straßentyp. Die relative Unsicherheit liegt je nach Subsegment im Bereich von 20 bis 70 %. Insbesondere Subsegmente mit geringen Anteilen am Bestand weisen eine höhere relative Unsicherheit auf. Interessant ist, dass SNF zwar auf Segmentebene (SNF) die geringste Unsicherheit aufweisen, sich auf detaillierter Ebene aufgrund der problematischen Zuordnung auf Subsegmentebene (z. B. Zuordnung eines SNF zu Lkw 28-26t oder Lastzug) eine große Bandbreite ergibt.

Abbildung 2: Streuung der Unsicherheiten der Fahrleistungen nach Fahrzeugkategorie



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkung: Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeugkategorie dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Fahrzeugkategorie. Aufgrund der Symmetrie der Verteilungen sind Ober- und Untergrenzen bis auf das Vorzeichen identisch, daher werden hier nur die Obergrenzen der 95%-Konfidenzintervalle gezeigt.

Neben den Beständen pro Fahrzeugtechnologie und den Fahrleistungen haben auch die Verkehrssituationen, die Fahranteile bei Fahrzeugen mit mehreren Energieträgern und auch die deutschlandspezifischen Energieeffizienzkorrekturfaktoren einen Einfluss auf den Verbrauch und somit auch auf die Aufteilung des Kraftstoffabsatzes auf die ZSE-Differenzierung. Für die drei genannten Aspekte werden ebenfalls Unsicherheiten ermittelt.

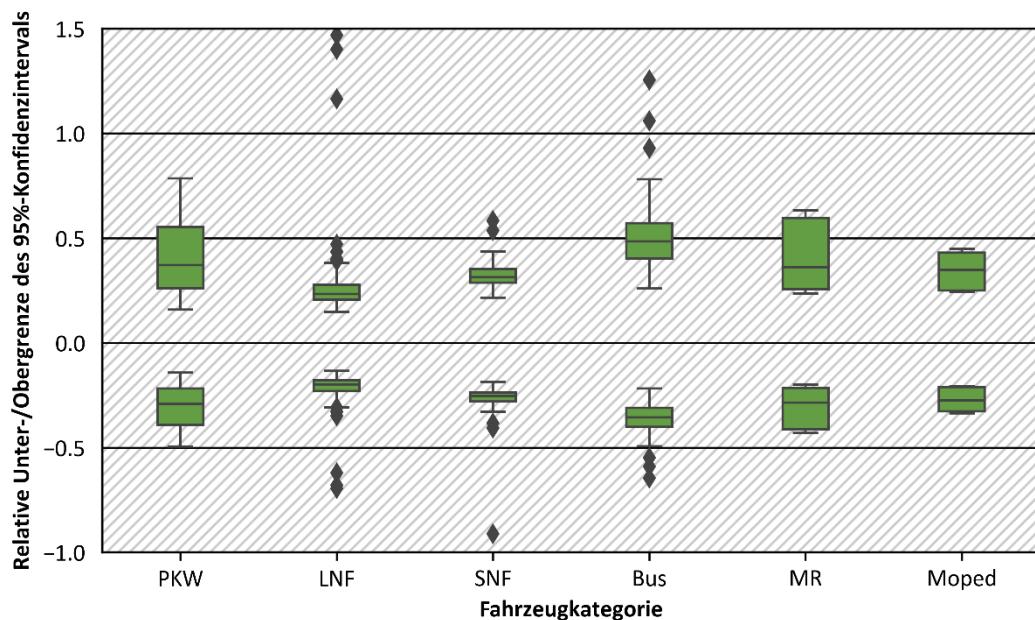
Durch Zusammenführen der genannten Größen (Fahrleistungen, Verkehrssituationen, Verbrauch etc.) mitsamt ihrer Unsicherheit über eine Monte-Carlo-Simulation können die relativen Unsicherheiten der Kraftstoffverbräuche nach ZSE-Differenzierung berechnet werden.

Die Kraftstoffverbräuche, die über TREMOD ermittelt werden, gehen nicht unmittelbar in das ZSE bzw. Inventar ein, sondern es wird noch eine Korrektur vorgenommen, die der der Kraftstoffverbrauch über einen Skalierungsfaktor (Energiebilanz-Korrekturfaktoren) auf den Kraftstoffabsatz skaliert wird.

Durch Berücksichtigung dieser Energiebilanzkorrektur können die Verbräuche auf ZSE-Ebene ermittelt werden.

Die Untergrenzen der Konfidenzintervalle der Kraftstoffverbräuche im ZSE liegen mehrheitlich zwischen -10 und -40 %, die Obergrenzen zwischen +20 und +60 %, siehe Abbildung 3. Der Median der Variationskoeffizienten liegt für die LNF am niedrigsten und die Linienbusse am höchsten; den größten Streubereich weisen Motorräder sowie Personenkraftwagen auf. Die Ausreißer mit hohen Unsicherheiten betreffen v. a. mit alternativen Energieträgern betriebene Fahrzeugschichten.

Abbildung 3: Streuung der Unsicherheiten der Kraftstoffverbräuche nach ZSE-Fahrzeugkategorie



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkungen: a) Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeugkategorie dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Fahrzeugkategorie. Die jeweils übereinanderliegenden Boxplots zeigen die Streuung der Unsicherheiten der Obergrenzen (positiver Bereich) und Untergrenzen (negativer Bereich) der 95%-Konfidenzintervalle. b) Ausreißer (Intervallgrenzen unterhalb -100% und oberhalb +150%) sind hier für die bessere Darstellung ausgeblendet.

Neben den Aktivitätsraten werden im ZSE auch die Emissionsfaktoren gegeben, deren Unsicherheiten zu bestimmen sind. Bei der Ermittlung der ZSE-Emissionsfaktoren sind sowohl die beschriebenen Unsicherheiten bzgl. der Verkehrsmengen als auch der Schichtemissionsfaktoren zu berücksichtigen. Die Schichtemissionsfaktoren sind der Input für das HBEFA und werden über PHEM bereitgestellt.

Die Unsicherheiten der Basis-Emissionsfaktoren werden für die regulierten Schadstoffe CO, HC, PM und NO_x für Diesel- und Benzinfahrzeuge pro Euro-Stufe und Fahrzeugkategorie bestimmt. Exemplarisch werden die Unsicherheiten für NO_x-Emissionen der Diesel-Pkw/LNF N1 I angegeben. Bei Pre Euro 1-Fahrzeugen liegt die Unsicherheit je nach Straßenkategorie bei +44 bis +66 %. Bei Euro 1 bis Euro 4 ist die relative Unsicherheit mit -27 bis +34 % geringer. Euro 5 und Euro 6abc weisen wiederum höhere Werte in Höhe von -54 bis +91 % auf. Wegen der geringen Stichprobengröße gemessener Kfz und den niederen absoluten Emissionsniveaus liegen die mit einer Bandbreite von 75 bis +172 % höchsten Unsicherheiten bei Euro 6d-TEMP und Euro 6d vor.

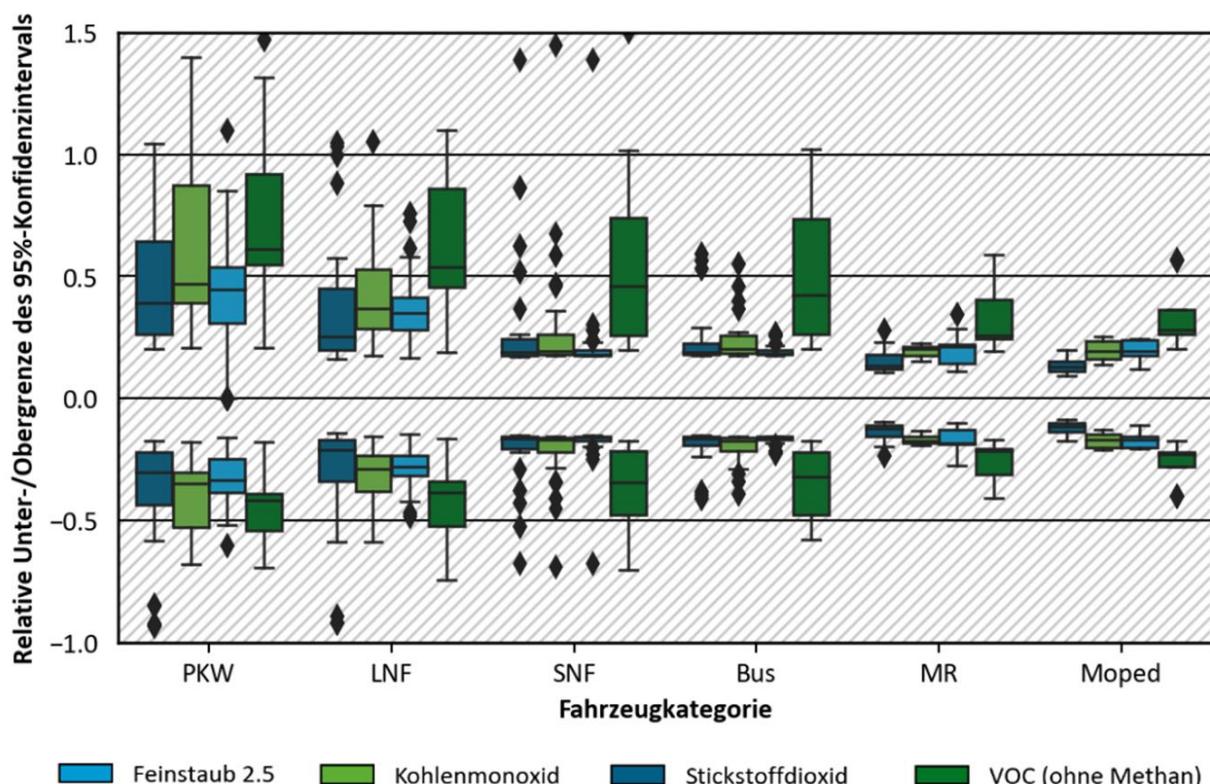
Besonders ist auf die Emissionsklasse EURO 6d hinzuweisen, für die nur von zwei Fahrzeugen Messdaten verfügbar waren. Daher wurden die Stichproben- und Modellunsicherheiten von EURO 6d-TEMP für EURO 6d übernommen. Die Empfehlung ist, weitere EURO 6d-Fahrzeuge zu vermessen, um deren Unsicherheiten zu reduzieren.

Des Weiteren werden noch die Unsicherheiten für Temperatur und Alterung sowie für die Kaltstartzusatzemissionen ermittelt.

Anhand der Schichtemissionsfaktoren und der Unsicherheiten bzgl. der Verkehrsmengen und Verkehrssituationen können die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren auf ZSE-Ebene errechnet werden. Abbildung 4 zeigt die Unsicherheiten der Antriebs-Emissionsfaktoren der regulierten Schadstoffe pro Fahrzeugkategorie, die sich aus der Monte-Carlo-Simulation ergeben. Die Untergrenzen der Konfidenzintervalle der Antriebs-Emissionsfaktoren im ZSE liegen mehrheitlich zwischen -10 und -55 %, die Obergrenzen zwischen +10 und 90 %. Von den regulierten Schadstoffen weist generell Stickstoffdioxid die geringsten und die Gruppe der NMVOC die höchsten Unsicherheiten auf.

Beim Stickstoffdioxid fallen, trotz der insgesamt niedrigeren Unsicherheiten, bei den Pkw und LNF einige Ausreißer nach oben auf. Diese sind der hohen Unsicherheit der Temperaturkorrektur geschuldet, welche bei den Stickoxiden aufgrund der in Richtung niederer Temperaturen reduzierten Abgasrückführung und SCR Effizienzen (ab Euro-5) appliziert werden muss.

Abbildung 4: Streuung der Unsicherheiten der Antriebs-Emissionsfaktoren regulierter Schadstoffe nach Schadstoff und Fahrzeugkategorie

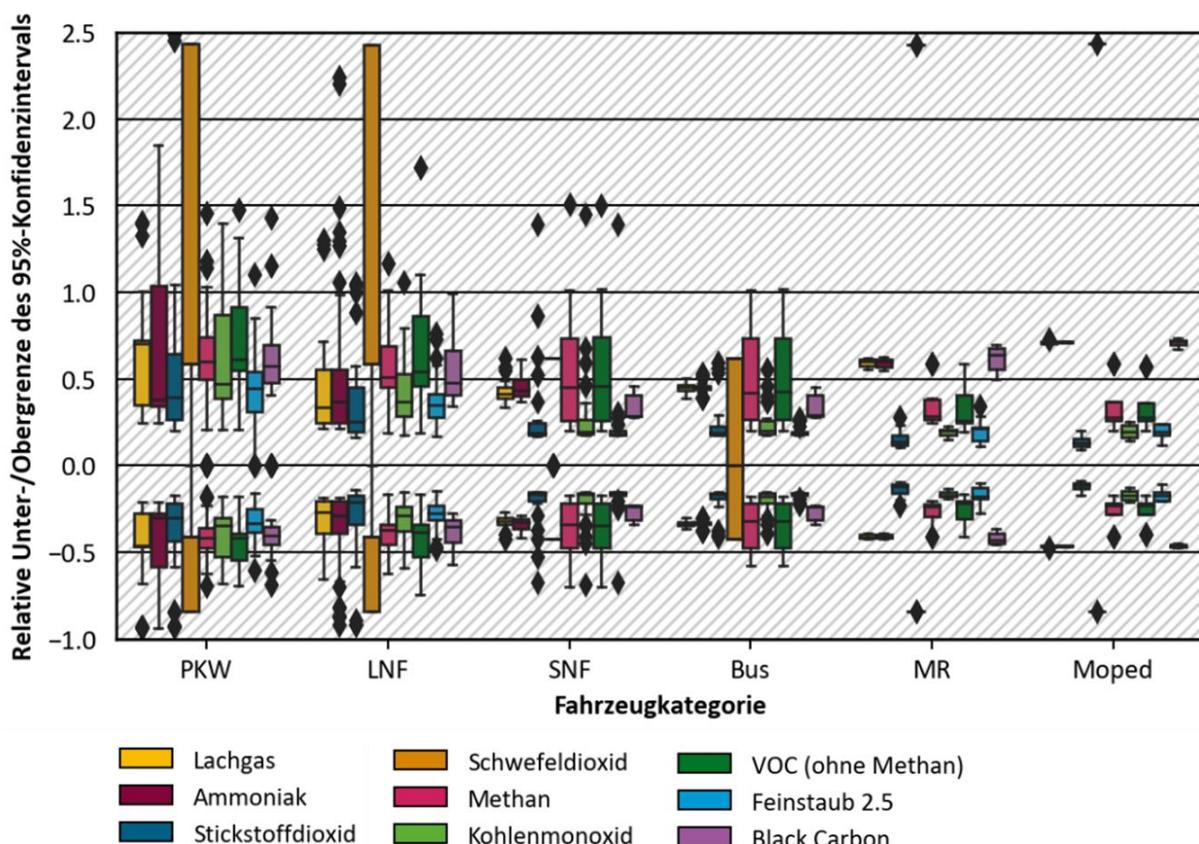


Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkungen: a) Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeugkategorie dar. Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Fahrzeugkategorie. Die jeweils übereinanderliegenden Boxplots zeigen die Streuung der Unsicherheiten der Obergrenzen (positiver Bereich) und

Untergrenzen (negativer Bereich) der 95%-Konfidenzintervalle. b) Ausreißer (Intervallgrenzen unterhalb -100% und oberhalb +150%) sind hier für die bessere Darstellung ausgeblendet.

Neben den regulierten Schadstoffen wurden auch die Unsicherheiten der nicht regulierten Schadstoffe NH₃, N₂O, CH₄, NMVOC, BC und SO₂ bestimmt. Diese werden in Abbildung 5 zusammengefasst.

Abbildung 5: Streuung der Unsicherheiten der Antriebs-Emissionsfaktoren nicht-regulierter Schadstoffe nach Schadstoff und Fahrzeugkategorie



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkungen: a) Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeugkategorie dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeuschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Fahrzeugkategorie. Die jeweils übereinanderliegenden Boxplots zeigen die Streuung der Unsicherheiten der Obergrenzen (positiver Bereich) und Untergrenzen (negativer Bereich) der 95%-Konfidenzintervalle. b) Ausreißer (Intervallgrenzen unterhalb -100% und oberhalb +250%) sind hier für die bessere Darstellung ausgeblendet.

Anhand der Resultate können Regelmäßigkeiten festgestellt werden, die zu folgenden Schlüssen führen:

- ▶ Allgemein können die absoluten CO₂-Emissionen relativ präzise ermittelt werden, da diese nur von den Unsicherheiten der Gesamtkraftstoffabsätze und den kraftstoffspezifischen CO₂-Emissionsfaktoren abhängen. Insbesondere der Absatz kann relativ genau ermittelt werden.
- ▶ Die ermittelten Resultate können nur indirekt in anderen Kontexten weiterverwendet werden.

- ▶ Damit in Zusammenhang steht, dass sich die Unsicherheitsverteilungen über mehrere Rechenschritte hinweg «normalisieren», sodass sie auf der finalen ZSE-Ebene (bzw. generell höheren Aggregationsebenen) in der Regel log-normalverteilt sind.
- ▶ Neuere Emissionsstandards wiesen oft höhere relative Unsicherheiten auf. Gründe dafür sind niedrige absolute Emissionswerte, die i. d. R. zu hoher relativer Messunsicherheit führen, kleine Stichprobenumfänge sowie die Verwendung von Korrekturfaktoren mit hoher Unsicherheit.
- ▶ Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:
 - Es sollten mehr Fahrzeuge der neuen Fahrzeugschichten (insb. Euro 6d) vermessen werden. Dies geschieht sollte in späteren Messkampagnen ohnehin der Fall sein.
 - Für Kaltstartemissionen wird eine Erweiterung des Ansatzes empfohlen, mit der auch PEMS-Messdaten zur Parametrierung nutzbar gemacht werden.
 - Es sollten mehr Messungen an unterschiedlich alten Fahrzeugen und bei unterschiedlicher Temperatur durchgeführt werden.

Obwohl eine Vielzahl an unterschiedlichen Faktoren in der Analyse berücksichtigt wurden, konnten einige Aspekte nur unzureichend oder gar nicht in die Betrachtung einbezogen werden:

- ▶ Für diejenigen Schadstoffe und Fahrzeugschichten, die nicht auf Messdaten aus der DBEFA beruhen, ist die Datenlage zu Unsicherheits-Inputs dünn. Die in diesen Fällen bspw. verwendeten «Precision indicators» aus EMEP/EEA (Ntziachristos und Samaras 2019) weisen selbst eine hohe Bandbreite auf, und es ist nirgends explizit festgehalten, auf welche Aggregationsebene sie sich beziehen. Sie sind auch nicht für alle Fahrzeugschichten vorhanden, weswegen für bestimmte Fahrzeugschichten (z. B. Gasfahrzeuge) auf Analogieschlüsse zurückgegriffen werden musste.
- ▶ Die Analyse wurde nur mit den Aktivitätsdaten von 2019 durchgeführt. Somit gelten die ermittelten finalen Unsicherheiten für das Jahr 2019. Werden sie für andere Jahre angewendet, so sollten sie als indikative Werte verstanden werden.
- ▶ Wie im vorangegangenen Punkt erwähnt, ist eine Übertragbarkeit der Unsicherheiten allgemein problematisch. Zu unterstreichen ist dieser Aspekt insbesondere bei neuen Fahrzeugtechnologien, deren aktueller Einsatz vom künftigen Einsatz abweichen kann. Hier sind insbesondere BEV und PHEV zu erwähnen.
- ▶ Bisher unzureichend berücksichtigt sind Unsicherheiten, die durch Annahmen und Festlegungen bei der Modellierungsmethodik entstehen. So beruht bspw. die Aufteilung von Lkw auf Solo-Lkw und Lastzug auf lange bestehenden Annahmen, die nur schwer zu validieren sind. Zudem konnten die Unsicherheiten der Fahrleistungen anhand der Fahrleistungserhebung 2014 abgeschätzt werden, jedoch gehen neben dieser Quelle auch weitere Quellen und Annahmen in die Berechnung der Fahrleistung in TREMOD ein. Die Unsicherheiten, die durch diese Komposition von Quellen und Annahmen entstehen können kaum beziffert werden.
- ▶ Die in TREMOD verwendeten absoluten Fahrleistungen und das Bestandsgerüst passen strenggenommen nur begrenzt zusammen. Die Fahrleistung umfasst die gesamten gefahrenen Kilometer auf dem Bundesgebiet. Demnach sind auch Fahrten von ausländischen Fahrzeugen enthalten. Demgegenüber setzt sich das Bestandsgerüst aus Fahrzeugen

zusammen, die in Deutschland zugelassen sind. Die Emissionsfaktoren der Fahrzeuge werden demnach ausschließlich über die Deutsche Fahrzeugflotte determiniert. Dieser Aspekt bleibt unberücksichtigt.

- ▶ Problematisch ist auch die verwendete Methodik für die Energiebilanzkorrektur, die einen großen Einfluss auf das Ergebnis hat, deren Genauigkeit aber kaum zu bestimmen ist.
- ▶ Des Weiteren werden aktuell einige Einflüsse auf Emissionen (noch) nicht berücksichtigt. In der Vergangenheit haben Modellerweiterungen und -verbesserungen überwiegend eine Erhöhung der Emissionen bewirkt, sobald bis dahin nicht betrachtete Einflüsse berücksichtigt wurden. Aktuell stellen die Kaltstartemissionen der schweren Nutzfahrzeuge einen Einfluss dar, der noch nicht berücksichtigt ist, sich aber erhöhend auf die Emissionen auswirken könnte.
- ▶ Die Unsicherheiten einiger Eingangsgrößen können nicht oder nur schwer abgeschätzt werden. Hier sind vor allem die Verkehrssituationen zu nennen, denn die Anteile der Verkehrssituationen (z. B. Stop-and-Go innerstädtisch) an der Fahrleistung pro Fahrzeugkategorie (z. B. Pkw) sind generell schwer zu quantifizieren und ihre Unsicherheiten können nicht belastbar ermittelt werden.

Indem dann geprüft werden kann, ob deren Werte innerhalb der hier genannten 95%-Konfidenzintervalle liegen, werden zukünftige Updates der Emissionsfaktoren und Aktivitätsdaten Hinweise liefern, wie zutreffend die hier berechneten Unsicherheiten sind.

Flugverkehr

Die Summe der Aktivitätsraten der Quellgruppen 1.A.3.a und 1.D.1.a des Treibhausgasinventars entspricht dem in den Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland dokumentierten Endenerieverbrauch des Sektors „Zivile Luftfahrt“.

Die Gesamtmenge für die Emissionsberichterstattung werden den Mineralölstatistiken des BAFA entnommen und im ZSE je Energieträger unterteilt nach Flugphase (LTO, CCD) und Zielflughafen (national, international).

Bei der Bestimmung der Unsicherheit des Kraftstoffabsatzes (primäre Aktivitätsrate) werden die Aspekte „unvollständige Erhebung“, „Messungenauigkeit“ und „Zuordnungsgenauigkeit“ berücksichtigt. Unter Berücksichtigung der drei genannten Unsicherheiten sowie der Unsicherheit bzgl. des Heizwertes können anhand einer Monte-Carlo-Simulation die relativen Unsicherheiten der Absätze in der zivilen Luftfahrt hergeleitet werden (95%-Konfidenzintervall). Diese ergeben sich zu -0,44 bis +2,06 % für Kerosin und -0,20 bis +2,67 % für Flugbenzin. Aufgrund des Heizwertes, der in TREMOD verhältnismäßig gering angenommen ist, erhält man eine schiefe Verteilungsfunktion mit Tendenz zu höheren Werten.

Für die Aufteilung der Kraftstoffmengen im ZSE sind zusätzlich noch Unsicherheiten bzgl. der Verkehrsmengen und spezifischen Verbräuche der Flugzeuge zu berücksichtigen. Die Verkehrsmengen werden nach § 12 des Verkehrsstatistikgesetzes erhoben und vom Statistischen Bundesamt (Destatis) aufbereitet. In TREMOD werden die Verkehrsmengen über eine jährliche Destatis-Sonderauswertung integriert. Aufgrund der verbindlichen Meldung kann davon ausgegangen werden, dass die Daten quasi vollständig erhoben werden und die Fehler bzgl. der Starts und zurückgelegten Großkreisdistanzen vernachlässigbar sind.

Abweichungen gibt es bei den Modellannahmen in TREMOD. Hier weichen zum einen die Großkreisdistanzen von den Angaben aus Destatis ab und zum anderen werden zusätzlich Flugeffizienzen (Umwege) angenommen, die Unsicherheiten unterworfen sind.

Die Großkreisdistanzen weichen, je nach Distanzklasse, für Kurzstreckenflüge um 1 bis 38 %, für Mittelstreckenflüge um 0,8 bis 3,6 % und für Langstreckenflüge um 0,8 bis 20 % von den Destatis-Angaben ab.

Die genannten Werte beziehen sich lediglich auf die Großkreisdistanz (GKD). Diese Entfernung wird in TREMOD jedoch noch angepasst, da in der Realität nicht die direkte Luftlinie zwischen den beiden Flughäfen geflogen wird (Großkreisdistanz), sondern Umwege entstehen bspw. durch bessere Luftströmungsbedingungen, An- und Abflugschneisen oder Flugverbotszonen.

Für den in TREMOD berechneten Umweg werden, je nach Distanzklasse, Unsicherheiten im Bereich von 64 bis 108 % bei Kurzstrecken, 52-64 % bei Mittelstrecken und 48 % bei Langstrecken angesetzt.

Neben den Starts und den Flugzeug-km können auch die Taxi-Zeiten zu den granularen Aktivitätsraten gezählt werden. Die Taxi-Zeit gibt an, wie lange das Flugzeug am Boden steht und, bei Teillast der Triebwerke, rangiert wird. Je nach Flughafen weisen die Taxi-Zeiten eine Unsicherheit von 56 bis 72 % auf.

Die Schichtemissionsfaktoren entsprechen beim Flugverkehr den Emissionsfaktoren pro Flugzeugtyp. Unsicherheiten entstehen hier auf den Ebenen „Messungen“, „Typenerfassung“ und „Modellierung/Real“.

Die verwendeten Emissionsfaktoren werden überwiegend dem „*Master emissions calculator*“ der EEA entnommen (EEA 2019). Dieser basiert auf Modellen von Eurocontrol, welche sich wiederum u. a. auf Messdaten stützen (Eurocontrol 2016). Diese Messdaten werden insb. von der ICAO in einer Turbinendatenbank zusammengefasst (ICAO 2019). Über die Modellierung werden sowohl die Verbräuche als auch die Schadstoffemissionen CO, PM, NO_x, HC ermittelt. Für die Messungen wird eine relative Unsicherheit von 32 % für HC, 12 % für CO, 10 % für NO_x, 40 % für PM und ca. 2,4 % für Kraftstoff angenommen.

Eine weitere Unsicherheitsquelle ist die Typenerfassung. Nicht alle Flugzeugtypen in TREMOD sind durch die EEA gegeben, sodass stellenweise eigene Abschätzungen anhand des MTOW und der Antriebsart oder anhand der eingesetzten Turbine durchgeführt werden. Je nach Antriebsart (Propeller, Turbo-Prop, Jet, Sonstige), Schadstoff (HC, CO, NO_x, PM, Kraftstoffmasse) und Flugphase (LTO, CCD) sind die Unsicherheiten sehr hoch. Für die Typenerfassung wird eine relative Unsicherheit von 132 bis 276 % für HC, 80-184 % für CO, 82-118 % für NO_x, 120-318 % für PM und 26-318 % für den Kraftstoffeinsatz angenommen. Diese Unsicherheiten werden nur auf Flugzeuge angewendet, für die keine spezifischen Informationen über den Flugzeugtyp gegeben sind, also nur einen kleinen Teil der Flugzeuge.

Zudem können die in der Realität auftretenden Verbräuche und Emissionen von den modellierten Werten abweichen. Gründe hierfür sind u. a. reales Flugzeuggewicht, Luftströmungen, Temperatur und Luftdruck. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, wird eine weitere Unsicherheit für die modellierten Verbräuche sowie vier Schadstoffe CO, PM, NO_x und HC angesetzt. Es wird eine zusätzliche relative Unsicherheit von 15 % angenommen.

Die drei Ebenen „Messungen“, „Typenerfassung“ und „Modellierung/Real“ werden für die Monte-Carlo-Analyse zur Bestimmung der ZSE-Emissionsfaktoren und der Aufteilung des Kraftstoffverbrauchs auf nationale/internationale Flüge zusammengefügt. Die Unsicherheiten werden auf Ebene der Flugzeugtypen, Relationen und Distanzklassen angewendet.

Neben den o. g. Schadstoffemissionen werden im ZSE auch CH₄, N₂O, NH₃, SO₂, NMVOC, BC berichtet. Für N₂O kann ein Minimalwert von 14 und ein Maximalwert von 160 mg/kg_{Kraftstoff} abgeleitet werden. Für NH₃ wird eine Bandbreite von 0 bis 0,17 g/kg_{Kerosin} angenommen. Für SO₂ gilt eine relative Unsicherheit von ca. 60 %.

Die Methanemissionen werden über die Eckwerte von 10 bis 330 mg/kg_{Kraftstoff} für LTO und -87 bis -21 mg/kg_{Kraftstoff} für CCD abgeleitet. Die Unsicherheiten der NMVOC-Emissionen ergeben sich direkt aus den Unsicherheiten der HC- und CH₄-Emissionen, denn die NMVOC entsprechen der Differenz beider Schadstoffe. Ruß (BC) stellt eine Fraktion der Partikelemissionen (PM) dar. Es wird ein Anteil in der Bandbreite von 12 bis 60 % angenommen.

Aus der Zusammenführung sämtlicher beschriebener Unsicherheiten über eine Monte-Carlo-Simulation können die Unsicherheiten der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren auf ZSE-Ebene berechnet werden. Allgemein ist die Bilanzierung bei Flugbenzin höheren Unsicherheiten unterworfen, da insbesondere hier keine hinreichenden Informationen bzgl. der Flug-km und der eingesetzten Flugzeugtypen vorliegen. Da der Anteil an den Emissionen durch die Verbrennung von Flugbenzin deutlich kleiner ist als von Kerosin, haben diese hohen Unsicherheiten aber keine große Auswirkung auf die Unsicherheit der Gesamtemissionen des zivilen Luftverkehrs. Beim Flugbetrieb mit Kerosin sind die relativen Unsicherheiten zwar geringer, jedoch sind bei einigen Schadstoffen die Quantifizierungen äußerst schwierig.

Einerseits weist der für den Nationalen Inventarbericht relevante Energieverbrauch der nationalen Flüge eine verhältnismäßig niedrige Unsicherheit von ungefähr ±8 % auf. Bei Einordnung in das „Precision Rating“ der EMEP/EEA wäre dies die Stufe A (EMEP/EEA 2019). Andererseits ist die Genauigkeit bei der Ermittlung der Schadstoffe NMVOC und CO gering (ca. -52 bis +86 % relative Abweichung möglich, Stufe C). Eine hohe relative Unsicherheit haben ebenfalls nationale NH₃-, PM- und BC-Emissionen. Diese können in einem Bereich von bis zu ±100 % eingeordnet werden (Stufe C). Die nationalen NO_x-, SO₂- und N₂O-Emissionen weisen eine Unsicherheit im Bereich von 10 bis 40 % auf (Stufe A-B).

Der gesamte Energieverbrauch der internationalen Flüge weist eine Unsicherheit von ungefähr ±2 % auf. BC sowie NMVOC können mit einer Genauigkeit von unter ±35 % ermittelt werden, wobei NH₃ mit ±99 % am ungenauesten bestimmt werden kann. Die internationalen CO-, NO_x-, SO₂- und N₂O- und PM-Emissionen weisen eine Unsicherheit im Bereich von 5 bis 10 % auf (alle Stufe A). Relativ erscheinen die internationalen Flugemissionen zwar genauer bestimmbar zu sein, allerdings ist ihr Anteil an den Gesamtemissionen des zivilen Luftverkehrs deutlich höher, sodass die Unsicherheiten der absoluten Emissionsmengen größer sind als beim nationalen Flugverkehr.

Im Rahmen der Unsicherheitenanalyse konnten einige Erkenntnisse gewonnen werden, die kritische Aspekte der Eingangsdaten und der Modellannahmen für TREMOD-AV offenlegen.

Ein Aspekt ist die verwendete Methode, um den Energieabsatz auf Relation (national, international) und Phase (LTO, CCD) aufzuteilen. Würde hier eine andere Methode angewandt werden, so ergäbe sich auch eine andere Aufteilung. Da eine Integration der Unsicherheit der verwendeten Methode in die Analyse problematisch ist, wurde dieser Aspekt nicht weiter durchleuchtet.

Problematisch ist es allerdings, die relativen Unsicherheiten für andere Jahre als das Betrachtungsjahr anzunehmen. Zwar können diese als Abschätzung verwendet werden, jedoch unterscheiden sich die Jahre bzgl. einer Vielzahl von Eingangsparametern, die wiederum einen Einfluss auf die Unsicherheiten haben.

Da bei der Unsicherheitenanalyse eine umfassende Recherche und Überprüfung sämtlicher Eingangsgrößen durchgeführt wurde, konnten die aktuellen Annahmen in TREMOD hinterfragt werden. Ein Großteil ist weiterhin plausibel, aber es wurden auch einige Parameter identifiziert, die zu überprüfen wären. Zu nennen sind hier insb. die Flugeffizienz (Umweg), der Heizwert und

einige Emissionsfaktoren (z. B. NH₃). Bei allen Größen konnten systematische Abweichungen zu den Literaturwerten beobachtet werden.

Summary

Due to international requirements for the reporting of transport emissions by the IPCC, information on the accuracy of the calculations must be provided in addition to the calculation of these emissions. The data used for this purpose at the Federal Environment Agency (UBA) are based on analyses and assessments from 2009 (Knörr et al. 2009). Concerning the changes that have occurred since then (e.g. efficiency, directives) and the intensified debates and framework conditions regarding transport emissions (e.g. Federal Climate Protection Act), it is essential to update the uncertainty assessment. The determination of uncertainties must be carried out for greenhouse gases and relevant pollutant emissions.

The aim of the project is therefore to derive current uncertainties for all relevant activity rates and emission factors for the source groups "civil aviation" (1.A.3.a and 1.D.1.a) and "road transportation" (1.A.3.b) and to transfer them to the Central System Emissions (ZSE) database system which is the base of the emission reporting. The Transport Emission Model (TREMOD) of the UBA is used for the emission calculation.

Both "road transportation" and "civil aviation" have significant contributions to greenhouse gas and pollutants emissions. For the emission calculation differentiated modelling tools are used. In the sector "road transportation", these are the vehicle model PHEM from Graz University of Technology and FVT, the emission model "Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr" (HBEFA) from INFRAS and the inventory model TREMOD from ifeu/UBA. For "civil aviation", the TREMOD Aviation (TREMOD-AV) model developed by ifeu is used. For the automated transfer to the ZSE, interfaces already exist for the activity rates and emission factors from TREMOD. These are now to be supplemented with the data for the uncertainties of the activity rates and emission factors.

The basis for determining the absolute emission quantities of traffic is the primary activity rate of the sector. The primary activity rate is in this context the annual fuel sales in Germany. The primary activity rates of the sectors "civil aviation" and "road transportation" are taken from the energy balances for Germany prepared by the AG Energiebilanz.

Within TREMOD and TREMOD-AV, an allocation of the primary activity rates follows. The breakdown is to be made according to the differentiation in the ZSE. The ZSE and the National Inventory Report provides for the following differentiation:

► Road transportation:

- Fuel type: Diesel, biodiesel, natural gas, biogas, petrol, ethanol, LPG, LNG
- Vehicle category: Bus, light commercial vehicle (LCV), moped, motorcycle, passenger car (PC), heavy goods vehicle (HGV)
- Emission standard: conventional, Euro 1/I till Euro 5/V, Euro 6/VI (ab, c, d, d-TEMP)
- Road category: highway, rural, urban
- Emission type: combustion, evaporation

► Civil aviation:

- Fuel type: kerosene, aviation gasoline (Avgas)
- Destination airport (relation): national, international

- Phase: LTO, CCD

In the case of “road transportation”, the allocation is very granular, based on high-resolution mileage and vehicle stock data, specific fuel consumption, emission factors, etc. In the case of “aviation” aircraft movements and specific emissions are used as differentiating factors. For the calculation of the emissions in the context of the National Inventory Reports, these very specific activity data are aggregated to the level of detail given in the ZSE.

In addition to the allocation of the primary activity rates to the ZSE differentiation, TREMOD also calculates the emission factors. Based on the primary activity rates and the (fuel-specific) emission factors, the total emissions of the two source groups considered can eventually be determined.

The following emissions are transferred to the ZSE differentiation:

- ▶ Greenhouse gases²: CH₄, N₂O
- ▶ Pollutants: NH₃, BC, PM_{2.5}, PM₁₀, total suspended particles (TSP), NMVOC, NO_x, SO₂, CO

In order to determine the uncertainties of the primary activity rates and emission factors in the ZSE differentiation, the uncertainties of the primary activity rates, traffic volumes and emission factors which are the input data of TREMOD and TREMOD-AV need be determined in a first step. Based on this analysis, the uncertainties of the distribution of primary activity rates and calculated emission factors generated in TREMOD and TREMOD-AV shall be derived. The reference year for determining the relative uncertainties is 2019.

The following parameters are shown for the determined uncertainties:

- ▶ upper and lower limits: U_{min} und U_{max}, in percent [%]
- ▶ Distribution function: normal, log-normal, triangular, continuous uniform

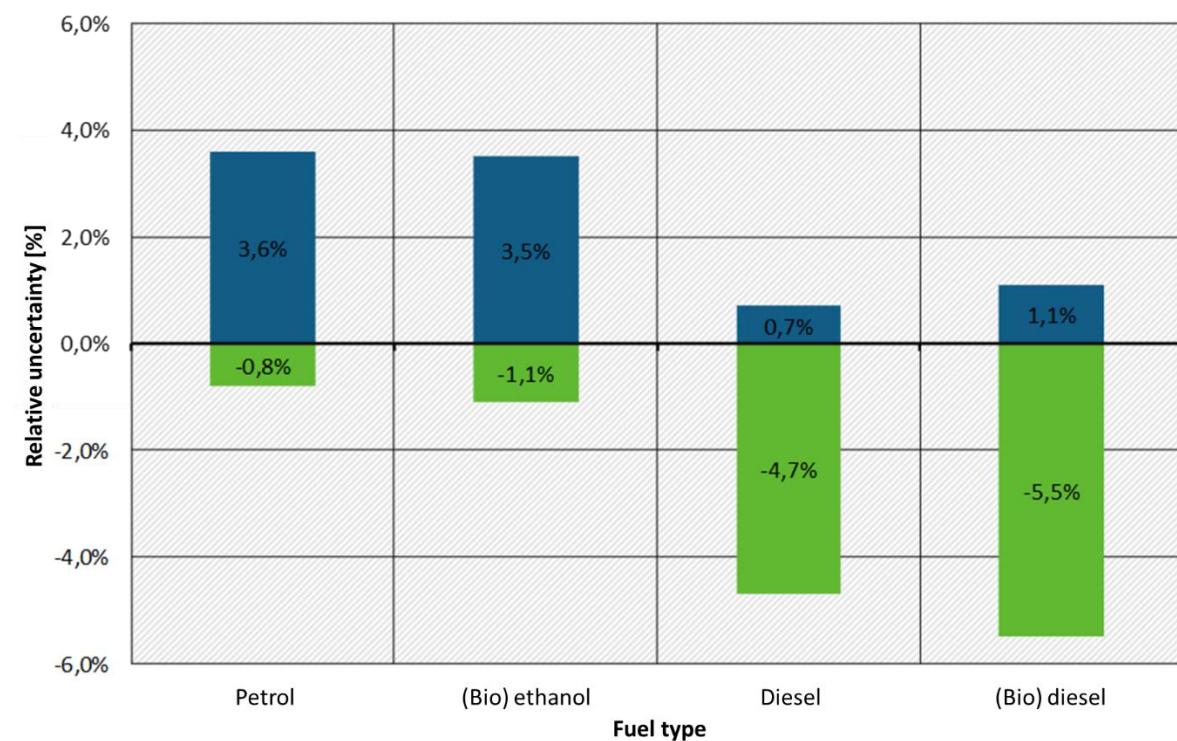
Road transportation

Uncertainties exist both for the primary activity rates per fuel type and for the emission factors after the above-mentioned differentiation for road transport. These uncertainties arise at different levels and are to be determined at the respective points in the models.

The primary activity rates are given by (AG Energiebilanzen o.J.). Due to the statistical collection method, a high degree of accuracy is given here. Depending on the fuel type, the relative uncertainty lies in the range of a maximum of 5.5%, see Figure 1.

² The uncertainty assessment of CO₂ is not covered by the study.

Figure 1: Uncertainty of sales - Road transport per fuel type



Source: Own illustration, ifeu.

As described above, the emissions resulting from combustion depend on a number of factors (e.g. vehicle category, emission standard, etc.). As a result, the sales volumes must also be divided up in the differentiation mentioned in order to enable determination of the absolute emissions via the associated emission factors. For this breakdown, the traffic volumes (granular activity rates) on the one hand and the specific consumption of the vehicles on the other hand are relevant.

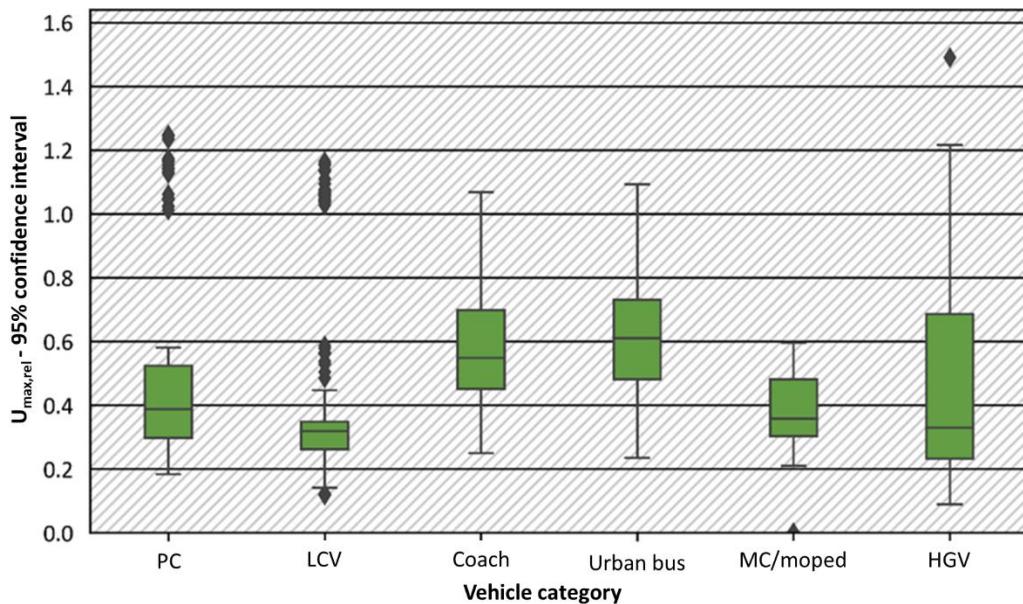
The uncertainties of the traffic volumes are determined here in particular via the uncertainties of the stocks (absolute stocks, shares of drive technologies, emission standards, particle filters and catalysts), the mileages as well as the traffic situations and energy efficiency corrections. In the case of the absolute stocks per vehicle category (PC, LCV, etc.), it can be stated that there are low uncertainties, as a good statistical basis is available here. The uncertainty here is less than one percent. Higher uncertainties exist in the distribution of absolute stocks among the sub-segments (e.g. PC petrol Euro 6d, semi-trailer truck Euro V EGR, etc.). The stocks of sub-segments with a high proportion of the stock show a low relative uncertainty.

In contrast to the inventories, mileage is not accurately and frequently statistically collected. As a result, the uncertainties are significantly higher than for the vehicle stock. The total mileage of passenger cars, for example, has a relative uncertainty of approx. 20%. Depending on the road category, the relative uncertainty range here is approx. ± 12 to $\pm 26\%$. In contrast, HGV, which also have a high relevance for emissions and fuel consumption, can be given with a higher accuracy, because here the mileage of HGV $> 7.5\text{t}$ on motorways and federal roads is given by toll statistics. The relative uncertainty of the total mileage is 6%, with an uncertainty of 10-12% off motorways.

If the uncertainties regarding vehicle stocks and mileage are linked via the fleet model of the HBEFA, the uncertainties of mileage are obtained from Figure 2. Here, the upper limits of the relative uncertainty for mileage per sub-segment (e.g. PC diesel Euro 4) and road type are shown

for each vehicle category. The relative uncertainty is in the range of 20-70% depending on the sub-segment. In particular, sub-segments with small shares of the stock have a higher relative uncertainty. It is interesting to note that although HGV have the lowest uncertainty at segment level (HGV), the problematic allocation at sub-segment level (e.g. allocation of a HGV to truck 28-26t or road train) results in a wide range at detailed level.

Figure 2: Dispersion of the uncertainties of driving performance by vehicle category



Source: Own illustration, INFRAS. Note: The figure presents the scatter of the confidence interval limits per vehicle category. Each combination of vehicle stratum (subsegment) and road category yields a single value; the boxplots show the scatter of the single values per vehicle category. Due to the symmetry of the distributions, upper and lower limits are identical except for the sign, therefore only the upper limits of the 95% confidence intervals are shown here.

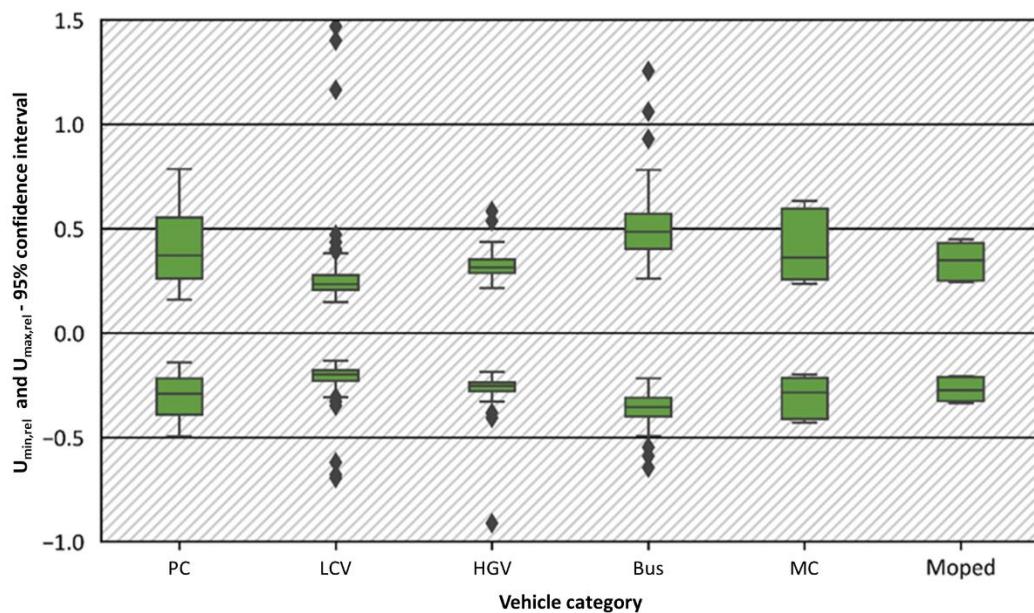
In addition to the stocks per vehicle technology and the mileage, the traffic situations, the driving shares for bi-fuel vehicles and also the Germany-specific energy efficiency correction factors have an impact on consumption and thus on the allocation of activity rates in the ZSE differentiation, too. Uncertainties are also determined for the three aspects mentioned.

By combining the above-mentioned variables (mileage, traffic situations, consumption, etc.) together with their uncertainty via a Monte Carlo simulation, the relative uncertainties of fuel consumption in the ZSE differentiation can be calculated.

The fuel consumptions calculated in TREMOD are not directly used in the ZSE and inventory. Before, a correction is made. In this correction, the fuel consumption is scaled to the fuel sales via a scaling factor (energy balance correction factors).

By taking the energy balance correction into account, the consumption at the ZSE level can finally be determined. The lower limits of the confidence intervals of the fuel consumption in the ZSE are mostly between -10 and -40%, the upper limits between +20 and +60%, see Figure 3. The median of the coefficients of variation is lowest for the LCV and highest for buses; motorcycles and passenger cars show the largest scatter range. The outliers with high uncertainties mainly concern vehicle classes powered by alternative fuels.

Figure 3: Dispersion of fuel consumption uncertainties by ZSE vehicle category



Source: Own illustration, INFRAS. Notes: a) The figure shows the scatter of the confidence interval limits per vehicle category. Each combination of vehicle layer (sub-segment) and road category provides a single value; the boxplots show the dispersion of the single values per vehicle category. The boxplots on top of each other show the dispersion of the uncertainties of the upper limits (positive range) and lower limits (negative range) of the 95% confidence intervals. b) Outliers (interval limits below -100% and above +150%) are hidden here for better presentation.

In addition to the activity rates, the emission factors are also given in the ZSE. The uncertainties of the emission factors are determined as well. When determining the ZSE emission factors, both the uncertainties described regarding the traffic volumes and the base emission factors must be taken into account. The base emission factors are the input for the HBEFA and are provided via PHEM.

The uncertainties of the base emission factors are determined for the regulated pollutants CO, HC, PM and NO_x for diesel and petrol vehicles per emission standard and vehicle category. As an example, the uncertainties for NO_x emissions of diesel PC/LCV N1 I are given. For Pre Euro 1 vehicles, the uncertainty is 44 to +66% depending on the road category. For Euro 1 to Euro 4, the relative uncertainty is lower at -27 to +34%. Euro 5 and Euro 6abc again show higher values of -54 to +91%. Due to the small sample size of measured vehicles and the low absolute emission levels, the highest uncertainties are found for Euro 6d-TEMP and Euro 6d with a range of 75 to +172%.

Special reference should be made to the EURO 6d emission class. Here, measurement data were only available from two vehicles. Therefore, the sampling and model uncertainties of EURO 6d-TEMP were adopted for EURO 6d. The recommendation is to measure more EURO 6d vehicles to reduce the uncertainties for EURO 6d vehicles.

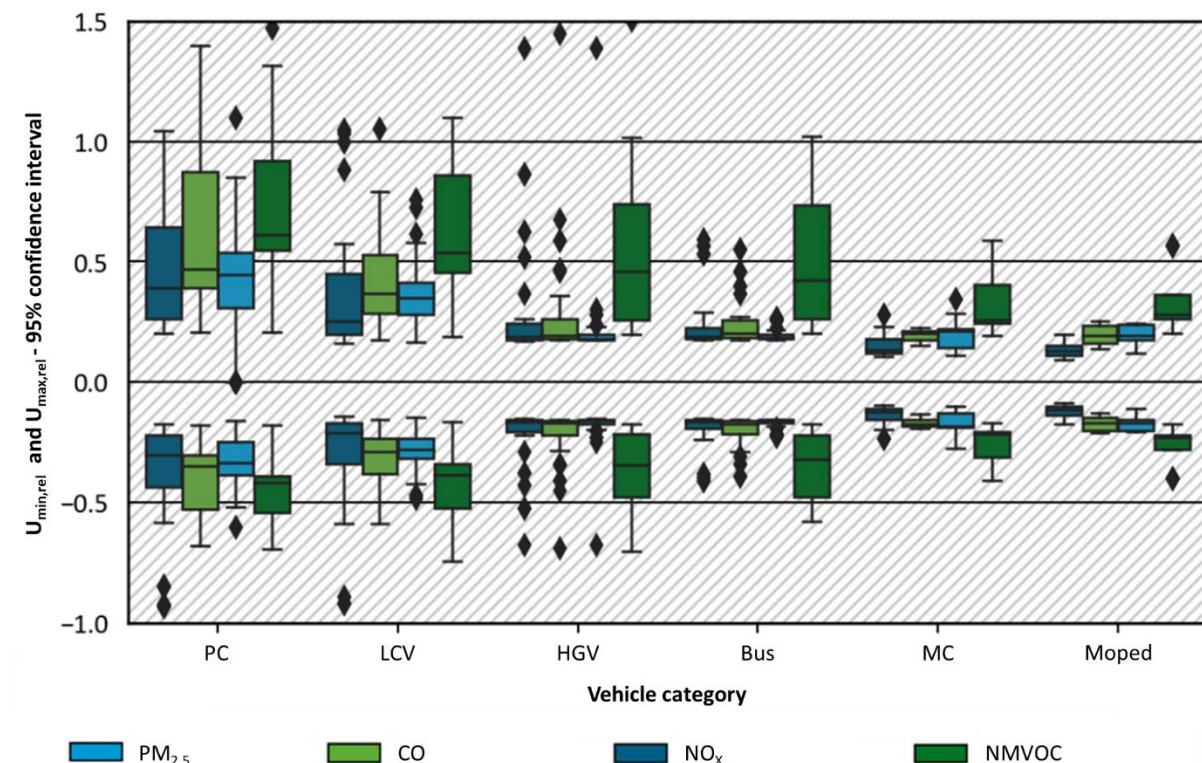
Furthermore, the uncertainties for temperature and deterioration as well as for cold start additive emissions are still determined.

Based on the base emission factors and the uncertainties regarding traffic volumes and traffic situations, the uncertainties of the emission factors can be calculated at the ZSE level. Figure 4 shows the uncertainties of the emission factors (excluding evaporation) of the regulated pollutants per vehicle category resulting from the Monte Carlo simulation. The lower limits of

the confidence intervals of the emission factors (excluding evaporation) in the ZSE are mostly between -10 and -55%, the upper limits between +10 and +90%. Of the regulated pollutants, NO_x generally has the lowest uncertainties and NMVOC the highest.

In the case of NO_x, despite the overall lower uncertainties, some upward outliers are noticeable for PC and LCV. These are due to the high uncertainty of the temperature correction, which must be applied for nitrogen oxides due to the reduced exhaust gas recirculation and SCR efficiencies (from Euro 5) in the direction of lower temperatures.

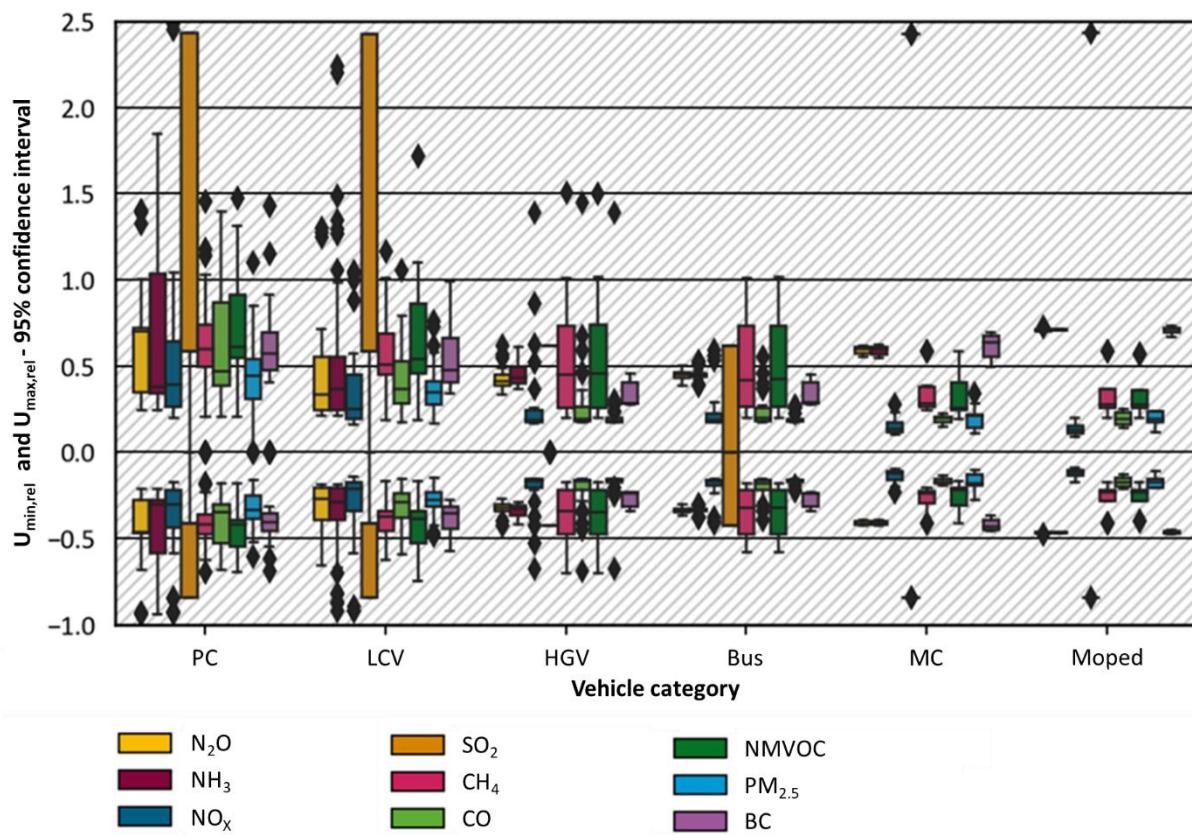
Figure 4: Dispersion of uncertainties of the propulsion emission factors of regulated pollutants by pollutant and vehicle category



Source: Own illustration, INFRAS. Notes: a) The figure presents the scatter of the confidence interval limits per vehicle category. Each combination of vehicle layer (sub-segment) and road category provides a single value; the boxplots show the dispersion of the single values per vehicle category. The boxplots on top of each other show the dispersion of the uncertainties of the upper limits (positive range) and lower limits (negative range) of the 95% confidence intervals. b) Outliers (interval limits below -100% and above +150%) are hidden here for better presentation.

In addition to the regulated pollutants, the uncertainties of the non-regulated pollutants NH₃, N₂O, CH₄, NMVOC, BC and SO₂ were also determined. These are summarised in Figure 5.

Figure 5: Dispersion of uncertainties of propulsion emission factors of non-regulated pollutants by pollutant and vehicle category



Source: Own illustration, INFRAS. Notes: a) The figure shows the scatter of the confidence interval limits per vehicle category. Each combination of vehicle layer (sub-segment) and road category provides a single value; the boxplots show the dispersion of the single values per vehicle category. The boxplots on top of each other show the dispersion of the uncertainties of the upper limits (positive range) and lower limits (negative range) of the 95% confidence intervals. b) Outliers (interval limits below -100% and above +250%) are hidden here for better presentation.

Based on the results, regularities can be identified that lead to the following conclusions:

- ▶ In general, the absolute CO₂ emissions can be determined relatively precisely, as these only depend on the uncertainties of the total fuel sales and the fuel-specific CO₂ emission factors. In particular, sales can be determined relatively precisely.
- ▶ The results obtained should only be used cautiously in other contexts.
- ▶ In connection with this, the uncertainty distributions "normalise" over several calculation steps, so that they correspond to a log-normal distribution at the final ZSE level (or generally higher aggregation levels).
- ▶ Newer emission standards often have higher relative uncertainties. The reasons for this are low absolute emission values usually leading to high relative measurement uncertainty, small sample sizes and the use of correction factors with high uncertainty.
- ▶ The following conclusions can be drawn:
 - More vehicles of the new vehicle classes (especially Euro 6d) should be measured. This is normally also done in later measurement campaigns.

- For cold start emissions, an extension of the approach is recommended with which PEMS measurement data can also be used to parameterise the cold start emissions.
- More measurements should be taken at different ages and temperatures.

Although a large number of different factors were considered in the analysis, some aspects could only be included insufficiently or not at all:

- ▶ For those pollutants and sub-segments that are not based on measurement data from DBEFA, the data on uncertainty inputs is thin. The "Precision indicators" from EMEP/EEA (Ntziachristos und Samaras 2019) used in these cases, for example, have a high bandwidth themselves, and it is nowhere explicitly stated to which aggregation level they refer. They are also not available for all sub-segments, which is why analogies had to be used for certain vehicles (e.g. gas vehicles).
- ▶ The analysis was only carried out with the 2019 activity data. Thus, the final uncertainties determined only apply to 2019. If they are applied to other years, they should be understood as indicative values.
- ▶ As mentioned in the previous point, transferability of uncertainties is generally problematic. This aspect should be emphasised in particular for new vehicle technologies whose current use may differ from future use. BEV and PHEV are particularly worth mentioning here.
- ▶ Uncertainties arising from assumptions and specifications in the modelling methodology have not been sufficiently considered so far. For example, the division of HGV into rigid trucks and articulated trucks is based on long-standing assumptions that are difficult to validate. In addition, it was possible to estimate the uncertainties of the mileage based on the 2014 mileage survey, but other sources and assumptions are also included in the calculation of mileage in TREMOD in addition to this source. The uncertainties arising from this composition of sources and assumptions can hardly be quantified.
- ▶ Strictly speaking, the absolute mileage used in TREMOD and the inventory framework only fit together to a limited extent. The mileage includes the total kilometres driven on federal territory. Accordingly, journeys by foreign vehicles are also included. In contrast, the vehicle stock is only given for vehicles registered in Germany. The emission factors of the vehicles are thus calculated merely by the German vehicle fleet. This aspect is not taken into account.
- ▶ The methodology used for the energy balance correction is also problematic. This has a significant impact on the result, but it is hardly possible to determine the accuracy of the method used.
- ▶ Furthermore, some influences on emissions are not (yet) considered. In the past, model extensions and improvements have predominantly led to an increase in emissions as soon as influences that had not been considered before were considered. Currently, the cold-start emissions of heavy-duty vehicles are an influence that has not yet been taken into account, but could have an increasing effect on emissions.
- ▶ The uncertainties of some input variables cannot be estimated or can only be estimated with difficulty. Here, the distributions of the traffic situations should be mentioned above all.

Future updates of the emission factors and activity data will provide indications of how accurate the uncertainties calculated here are by checking whether their values fall within the 95% confidence intervals mentioned here.

Aviation

The sum of the activity rates of sectors 1.A.3.a and 1.D.1.a of the greenhouse gas inventory corresponds to the final energy consumption of the "civil aviation" sector documented in the energy balances of the Federal Republic of Germany. The total quantities for emissions reporting are taken from the mineral oil statistics of the BAFA.

In ZSE, they are divided per fuel type into the flight phase (LTO, CCD) and destination airport (national, international).

In determining the uncertainty of fuel sales (primary activity rate), the aspects "incomplete data in statistical survey", "measurement inaccuracy" and "allocation accuracy" are considered.

Taking into account the three uncertainties mentioned as well as the uncertainty regarding the calorific value, the relative uncertainties of the sales in civil aviation can be derived by means of a Monte Carlo simulation (95% confidence interval). These result in -0.44 to +2.06% for kerosene and -0.20 to +2.67% for Avgas. Due to the calorific value, which is assumed to be relatively low in TREMOD, a skewed distribution function is obtained with a tendency towards higher values.

For the distribution of the fuel quantities in the ZSE, additional uncertainties regarding the traffic volumes and specific consumption of the aircraft must be considered. The traffic volumes are collected in accordance with §12 of the Transport Statistics Act and processed by the Federal Statistical Office (Destatis). In TREMOD, the traffic volumes are integrated via data provided by Destatis. Due to the binding reporting, it can be assumed that the data is collected almost completely and the errors regarding take-offs and great circle distances are negligible.

There are deviations in the model assumptions in TREMOD. Here, on the one hand, the great circle distances deviate from the data from Destatis and, on the other hand, additional flight efficiencies (diversions) are assumed, which are subject to uncertainties.

Depending on the distance class, the great circle distances for short-haul flights deviate from the data from Destatis by 1-38%. For medium-haul flights it is 0.8-3.6% and for long-haul flights 0.8-20%.

The above-mentioned values only refer to the great circle distance (GCD). However, this distance is still adjusted in TREMOD, since in reality not the linear distance between the two airports is flown (great circle distance), but detours occur, for example, due to better air flow conditions, approach and departure airstrips or no-fly zones.

For the detour calculated in TREMOD, uncertainties in the range of 64-108% for short distances, 52-64% for medium distances and 48 % for long distances are applied, depending on the distance class.

In addition to take-offs and aircraft km, taxi times can also be counted as part of the granular activity rates. The taxi time indicates how long the aircraft is on the ground and manoeuvring at partial load. The taxi times have an uncertainty of 56-72% depending on the airport.

The base emission factors correspond to the emission factors per aircraft type for air traffic. Uncertainties arise here at the "measurement", "type coverage" and "modelling - real" levels.

The emission factors used are mainly taken from the EEA's "Master emissions calculator" (EEA 2019). This is based on models from Eurocontrol, which in turn are based on measurement data (Eurocontrol 2016). These measurement data are compiled by ICAO in a turbine database (ICAO 2019). Both consumption and pollutant emissions of CO, PM, NO_x, HC are determined via modelling. A relative uncertainty of 32% for HC, 12% for CO, 10% for NO_x, 40% for PM and approx. 2.4% for fuel is assumed for the measurements.

Another source of uncertainty is the type coverage. Not all aircraft types in TREMOD are given by the EEA, so that for some aircraft types own estimates are made based on the MTOW and the propulsion type or based on the turbine used. Depending on the type of propulsion (propeller, turbo-prop, jet, other), pollutant (HC, CO, NO_x, PM, fuel mass) and flight phase (LTO, CCD), the uncertainties are very high. For the type coverage, a relative uncertainty of 132-276% for HC, 80-184% for CO, 82-118% for NO_x, 120-318% for PM and 26-318% for fuel is assumed. These uncertainties are only applied to aircraft where no specific information on the aircraft type is given. This is only a small proportion of aircraft.

In addition, the consumption and emissions occurring in reality may deviate from the modelled values. Reasons for this include real aircraft weight, air currents, temperature and air pressure. Uncertainties must therefore be determined for consumption and the four pollutants CO, PM, NO_x, HC. An uncertainty of 15% is assumed.

The three levels, "measurements", "type coverage" and "modelling - real", are combined for the Monte Carlo analysis to determine the ZSE emission factors and the allocation of fuel consumption to national/international flights. Uncertainties are applied at the aircraft type, relation and distance class level.

In addition to the above pollutant emissions, CH₄, N₂O, NH₃, SO₂, NMVOC, BC are also reported in the ZSE. For N₂O, a minimum value of 14 and a maximum value of 160 mg/kg_{fuel} can be derived. For NH₃ a range of 0- 0.17 g/kg_{kerosene} is assumed. For SO₂, a relative uncertainty of approx. 60% applies.

Methane emissions are derived using benchmarks of 10 to 330 mg/kg_{fuel} for LTO and -87 to -21 mg/kg_{fuel} for CCD. The uncertainties of the NMVOC emissions result directly from the uncertainties of the HC and CH₄ emissions. Soot (BC) represents a fraction of particulate matter (PM) emissions. A share in the range of 12 to 60% is assumed.

From the combination of all described uncertainties via a Monte Carlo simulation, the uncertainties of the activity rates and emission factors can be calculated at the ZSE level. In general, the balancing of aviation fuel is subject to higher uncertainties, since in particular here no sufficient information is available regarding the flight kilometres and the aircraft types used. Since the share of emissions from the combustion of Avgas is significantly smaller than from kerosene, these high uncertainties do not have a major impact on the uncertainty regarding the determination of total emissions from civil aviation. For kerosene, the relative uncertainties are lower, but for some pollutants the quantifications are extremely difficult.

On the one hand, the energy consumption of national flights, which is relevant for the National Inventory Report, has a relatively low uncertainty of about $\pm 8\%$. If classified in the EMEP/EEA "Precision Rating", this would be level A (EMEP/EEA 2019). On the other hand, the accuracy in determining the pollutants NMVOC and CO is low (approx. -52% to +86% relative deviation possible, Level C). National NH₃, PM and BC emissions also have a high relative uncertainty. These can be classified in a range of up to $\pm 100\%$ (Level C). National NO_x, SO₂ and N₂O emissions have an uncertainty in the range of 10-40% (Level A-B).

The total energy consumption of the international flights has an uncertainty of about $\pm 2\%$. BC as well as NMVOC can be determined with an accuracy of less than $\pm 35\%$, whereas NH₃ can be determined most imprecisely with $\pm 99\%$. International CO, NO_x, SO₂, N₂O and PM emissions have an uncertainty in the range of 5-10% (all Tier A). In relative terms, international aviation emissions appear to be more accurately determinable, but their share in total civil aviation emissions is significantly higher, so that the uncertainties in absolute emission levels are greater than for national aviation.

Within the framework of the uncertainty assessment, some insights were gained that reveal critical aspects of the input data and the model assumptions for TREMOD-AV.

One aspect is the method used to allocate energy sales to relation (national, international) and phase (LTO, CCD). If a different method were used, this would also result in a different allocation. This aspect was not examined further.

It is problematic to assume the relative uncertainties for years other than the year 2019. Although these can be used as a rough estimate for other years, the years differ with regard to a large number of input parameters, which in turn have an impact on the uncertainties.

Since a comprehensive research and review of all input parameters was carried out in the uncertainty assessment, some current assumptions in TREMOD could be questioned. Most of them are still plausible, but some parameters were identified that should be reviewed. In particular, the flight efficiency (detour), the calorific value and some emission factors (e.g. NH₃) should be mentioned here. Systematic deviations from the literature values were observed for those parameters.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Die Emissionen des Verkehrs – insbesondere des Straßen- und Flugverkehrs - stehen im Fokus des öffentlichen Interesses wie auch der politischen und gesellschaftlichen Diskussion.

Durch internationale Vorgaben für die Berichterstattung der Emissionen des Verkehrs durch das IPCC sind neben der Berechnung dieser Emissionen auch Angaben zu der Genauigkeit der Berechnungen anzugeben. Die hierfür im Umweltbundesamt (UBA) verwendeten Angaben gehen auf Analysen und Bewertungen aus dem Jahr 2009 zurück (Knörr et al. 2009). In Anbetracht der seitdem eingetretenen Änderungen (z. B. Effizienz, Richtlinien) und den verschärften Debatten und Rahmenbedingungen bzgl. der Verkehrsemissionen (z. B. Bundes-Klimaschutzgesetz) ist eine Aktualisierung unabdingbar.

Zur Erfüllung der internationalen Berichtspflichten ist die Dokumentation der Datenqualität erforderlich. Die Berechnungen der Emissionen müssen dabei transparent, vergleichbar, vollständig, konsistent und möglichst exakt sein. Teil dieser Dokumentation ist zudem die Quantifizierung der Unsicherheiten dieser Berechnungen. Die Bestimmung der Unsicherheiten müssen hierbei für Treibhausgase und relevante Schadstoffemissionen durchgeführt werden.

Ziel des Projekts ist es daher, für die Quellgruppen „Ziviler Flugverkehr“ (1.A.3.a und 1.D.1.a) und „Straßenverkehr“ (1.A.3.b) für sämtliche relevanten Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren aktuelle Unsicherheiten abzuleiten und in das der Emissionsberichterstattung zugrundeliegende Datenbanksystem Zentrale System Emissionen (ZSE) zu überführen. Grundlage für die Berichterstattung ist das Transport Emission Model (TREMOD) des UBA.

Mit dem „Straßenverkehr“ und dem „Flugverkehr“ werden Quellgruppen mit hohen Beiträgen zu den Treibhausgasemissionen betrachtet, für die differenzierte Modellierungsinstrumente verwendet werden. Im Bereich Straßenverkehr sind dies das Fahrzeugmodell PHEM von der TU Graz und FVT, das Emissionsmodell „Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr“ (HBEFA) von INFRAS sowie das Inventarmodell TREMOD von ifeu/UBA. Für den Flugverkehr wird das von ifeu entwickelte Modell TREMOD Aviation (TREMOD-AV) eingesetzt. Für die automatisierte Übergabe in das ZSE existieren bereits Schnittstellen für die Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren für den Straßen- und Flugverkehr aus TREMOD. Diese sollen nun ergänzt werden mit den Angaben für die Unsicherheiten der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren.

Basis zur Bestimmung der absoluten Emissionsmengen des Verkehrs stellen die primären Aktivitätsraten der jeweiligen Quellgruppe dar. Als primäre Aktivitätsrate versteht man die jährlichen Kraftstoffliefermengen in Deutschland. Die primären Aktivitätsraten der Quellgruppen „Ziviler Flugverkehr“ und „Straßenverkehr“ werden aus den von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen erstellten Energiebilanzen für Deutschland entnommen, die ihrerseits auf Angaben des Mineralölwirtschaftsverbandes (seit November 2021 en2x – Wirtschaftsverband Fuels und Energie) zurückgehen.

Innerhalb TREMOD bzw. TREMOD-AV folgt eine Aufteilung der primären Aktivitätsraten. Die Aufteilung ist nach der Differenzierung im ZSE vorzunehmen. Das ZSE bzw. der Nationale Inventarbericht sieht die folgende Differenzierung vor:

► Straßenverkehr:

- Kraftstoffart: Diesel, Biodiesel, Erdgas, Biogas, Benzin, Ethanol, LPG, LNG
- Fahrzeugkategorie: Bus, LNF, Moped, Motorrad, Pkw, SNF

- Abgasnorm: Konventionell, Euro 1/I bis Euro 5/V, Euro 6/VI (ab, c, d, d-TEMP)
 - Straßenkategorie: Autobahn, außerorts, innerorts
 - Emissionsart: Antrieb, Verdunstung
- Ziviler Flugverkehr:
- Kraftstoffart: Kerosin, Flugbenzin
 - Zielflughafen: national, international
 - Flugphase: LTO, CCD

Im Falle des Straßenverkehrs erfolgt die Aufteilung sehr granular auf Basis hochauflöster Fahrleistungs- und Fahrzeugbestandsdaten, spezifischer Verbräuche, Emissionsfaktoren etc. Beim Flugverkehr dienen insb. die Flugbewegungen und spezifischen Emissionen der Flugzeugtypen als Differenzierungsgröße. Eingehendere Erläuterungen zur Methodik sind unter (Allekotte et al. 2020) und (ifeu und Öko-Institut 2010) zu finden. Für die Berechnung der im Rahmen der nationalen Berichterstattung veröffentlichten Emissionen werden diese sehr spezifischen Aktivitätsdaten wieder auf den im ZSE hinterlegten Detailierungsgrad aufsummiert.

Neben der Aufteilung der primären Aktivitätsraten in die ZSE-Differenzierung erfolgt in TREMOD zudem die Berechnung der Emissionsfaktoren. Anhand der primären Aktivitätsraten und der (kraftstoffspezifischen) Emissionsfaktoren können schlussendlich die Gesamtemissionen der beiden betrachteten Quellgruppen bestimmt werden.

Die folgenden Emissionen werden in die ZSE-Differenzierung überführt:

- Treibhausgase³: CH₄, N₂O
- Schadstoffe: NH₃, BC, PM_{2,5}, PM₁₀, TSP, NMVOC, NO_x, SO₂, CO

Zur Ermittlung der Unsicherheiten der primären Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren in der ZSE-Differenzierung sind in einem ersten Schritt die Unsicherheiten der aus anderen Datenquellen in TREMOD und TREMOD-AV übernommenen primären Aktivitätsraten, Verkehrsmengen und Emissionsfaktoren zu bestimmen. Ausgehend von dieser Analyse sind die Unsicherheiten der in TREMOD und TREMOD-AV erzeugten Aufteilung der primären Aktivitätsraten und berechneten Emissionsfaktoren abzuleiten.

Vereinfacht soll davon ausgegangen werden, dass die ermittelten relativen Unsicherheiten in der ZSE-Struktur für die gesamte Zeitreihe (2019 und Folgejahre) gültig sind. Bezugsjahr für die Ermittlung der relativen Unsicherheiten stellt das Jahr 2019 dar.

Es werden für die ermittelten Unsicherheiten folgende Parameter ausgewiesen:

- obere und untere Schranken: U_{min} und U_{max}, in Prozent [%]
- Art der Verteilung: normal, log-normal, Dreiecksverteilung, Gleichverteilung
- Quelle: bei unmittelbarer Verwendung veröffentlichter Unsicherheiten konkrete Quellangabe, ansonsten Verweis auf Endbericht dieses Projekts

³ Die Bestimmung der Unsicherheiten von CO₂ ist nicht Gegenstand in dem Projekt.

1.2 Vorgehen bei der Unsicherheitenanalyse

Im Folgenden wird das Vorgehen zur geforderten Unsicherheitenanalyse (Abschnitt 1.1) beschrieben. Hierzu wird zunächst ein Überblick über die Grundlagen der Emissionsberechnung gegeben. Im Anschluss erfolgt die Beschreibung der allgemeinen Herangehensweise bei Unsicherheitenanalysen. Dabei wird insb. Bezug auf die mathematischen Grundlagen genommen. Abschließend soll darauf aufbauend das konkrete Vorgehen in dieser Studie beschrieben werden.

1.2.1 Grundlagen der Emissionsberechnung

Emissionen von Treibhausgasen und Luftschatstoffen werden als Multiplikation von Aktivitätsraten und bezüglich Einheiten dazu passenden Emissionsfaktoren berechnet:

Formel 1: Berechnung der jährlichen Emissionen eines Schadstoffs

$$Em_{Schadstoff} = \sum_{Aktivitäten} (AR_{Aktivität} \cdot EF_{Aktivität, Schadstoff})$$

mit

- Em - Emission
 AR - Jährliche Aktivitätsrate
 EF - Emissionsfaktor

Für Emissionsinventare findet diese Berechnung mit zwei unterschiedlichen Typen von Aktivitätsraten und auf mehreren Aggregationsebenen statt:

- ▶ Die jährlichen Energieverbräuche nach Energieträger werden als „**primäre Aktivitätsraten**“ bezeichnet. Sie liegen als jährliche nationale Absatzmengen pro Kraftstofftyp vor, in Deutschland erarbeitet von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, welche ihrerseits auf Angaben des Mineralölwirtschaftsverbandes (heute: en2x) zurückgreift. Diese Kraftstoffmengen können mit energiebezogenen Emissionsfaktoren multipliziert werden, um die Emissionen auf aggregierter Ebene zu berechnen. Dabei kann die Aktivitätsrate entweder über die Kraftstoffmasse oder Energiemenge des Kraftstoffs gegeben werden. Dementsprechend müssen auch die Emissionsfaktoren massen- oder energiespezifisch angegeben werden. Das Produkt der Größen ergibt schlussendlich die Gesamtemissionen.
Die Berechnung der Emissionen auf dieser hohen Aggregationsebene ist einfach und robust. Sie erlaubt aber nicht die Zuweisung der Emissionen zu einzelnen Prozessen oder Verursachern. Außerdem können die Emissionsfaktoren von Schadstoffen, welche sich durch Verbrennungsprozesse bilden und nicht direkt aus dem Kraftstoff hervorgehen, nicht direkt auf dieser aggregierten Ebene gemessen, sondern nur durch Aggregation von Emissionsfaktoren auf detaillierteren Ebenen hergeleitet werden.
- ▶ Auf weiter differenzierten Ebenen liegen sogenannte „**granulare Aktivitätsraten**“ vor. Im Verkehrssektor entsprechen sie verkehrlichen Aktivitäten wie Fahrleistungen (Fahrzeugkilometer), Beständen, oder Starts und Stopps. Diese können mit Emissionsfaktoren in Gramm Emissionen pro Aktivitätstyp multipliziert werden. Die Emissionsfaktoren liegen idealerweise differenziert nach Fahrzeug- und Aktivitätstypen vor,

die in sich möglichst homogenes Emissionsverhalten zeigen. Für den Straßenverkehr beispielsweise entspricht diese differenzierteste Ebene einer Unterscheidung nach fast 800 Fahrzeugtypen und 365 Verkehrssituationen (s. Kap. 2.1.3). Da die granularen Aktivitätsraten nicht in dieser Differenzierung erhoben werden und auch die Emissionsmessungen teilweise auf stärker aggregierten Ebenen stattfinden, werden sie mittels Modellen bis auf die differenzierteste Ebene (d. h. die Ebene der Basis-Emissionsfaktoren) desaggregiert (siehe Abbildung 6 in Kap. 1.2.3).

1.2.2 Grundlagen der Unsicherheitsanalyse

1.2.2.1 Maß der Unsicherheit

Die Unsicherheit von Emissionen, Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren in Emissionsinventaren wird wie von der Europäischen Umweltagentur (EMEP/EEA 2019) empfohlen als 95%-Konfidenzintervall ausgedrückt. Dies bedeutet, dass:

- ▶ Die Wahrscheinlichkeit, dass der wahre Wert innerhalb des Intervalls liegt, beträgt 95%;
- ▶ Falls der wahre Wert außerhalb des Intervalls liegt, ist es gleich wahrscheinlich, dass er ober- oder unterhalb liegt.

Bei normalverteilten Variablen entspricht das 95%-Konfidenzintervall näherungsweise der jeweils zweifachen Standardabweichung um den Mittelwert.

1.2.2.2 Berechnung der Unsicherheiten der Eingangsdaten

Die Berechnung der Einzelunsicherheiten, also der 95%-Konfidenzintervalle der Eingangsdaten (Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren), wird in den jeweiligen Sektor-Kapiteln beschrieben (Straßenverkehr: Kap. 2.2 und 2.2.2.2, Flugverkehr: Kap. 3.2 und 3.3).

In der Stochastik werden zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Zustand einen bestimmten Wert einnimmt mit sogenannten Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgebildet. In den Eingangsdaten sind i. d. R. stetige Verteilungen zu erwarten. Hierbei gibt es verschiedene Typen. Relevant für die folgenden Analysen sind insbesondere: Normalverteilung, Log-Normalverteilung, Student-t-Verteilung, Gleichverteilung, Dreiecksverteilungen.

Welche Verteilungen für die jeweiligen Eingangswerte (z. B. Fahrleistung, Emissionsfaktor) verwendet werden, hängt u. a. von der Anzahl der Messwerte ab. Bei der folgenden Analyse wird bei jedem Eingangswert der jeweils zugrunde gelegte Verteilungstyp genannt. Allgemein werden zwei Annahmen getroffen. Zum einen wird bei einer sehr geringen Anzahl an Messdaten/recherchierten Werten (weniger als drei Werte) eine Gleichverteilung angenommen. Zum anderen wird eine Dreiecksverteilung angenommen, sofern der in der Modellierung (TREMOD) verwendete Wert nicht dem Mittelwert der recherchierten Messwerte/Statistiken entspricht.⁴ Wenn sich das 95%-Konfidenzintervall auch über den negativen Zahlenbereich erstreckt, jedoch physikalisch nur positive Werte auftreten können, dann wird die Log-Normalverteilung verwendet.

1.2.2.3 Fehlerfortpflanzung

Verläuft eine Berechnung über mehrere Schritte, pflanzen sich die Fehler in den Eingangsvariablen über die Berechnungsschritte fort. Diese Fehlerfortpflanzung kann auf zwei verschiedene Arten berücksichtigt werden:

⁴ Wenn nicht der Mittelwert in TREMOD verwendet wird, gibt es i. d. R. Gründe hierfür.

- ▶ Mittels Monte Carlo-Simulationen: Dabei wird ein Berechnungsschritt viele Male (typischerweise 10^4 - bis 10^6 -mal) wiederholt und dabei die Eingangsvariablen gemäß ihrer Unsicherheitsverteilung zufällig variiert. Anschließend wird die Unsicherheitsverteilung der Resultate bestimmt. Diese Methode funktioniert für alle Arten von Unsicherheitsverteilungen, erfordert aber Automatisierung und Rechenzeit.
- ▶ Mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzungsregeln: Für normalverteilte Variablen lassen sich zwei Regeln für die Addition und Multiplikation von unsicheren Variablen in einfachen Formeln ausdrücken (siehe Formel 2 und Formel 3). Die Anwendung dieser Formeln ist einfach und liefert die Unsicherheit des Resultats in einem einzigen Berechnungsschritt, lässt sich aber nur für (log)normalverteilte, unteineinander unkorrelierte Variablen mit „nicht zu großer Unsicherheit“ (gemäß EMEP/EEA 2019: bei Standardabweichungen von bis ca. 30 % des Mittelwertes) anwenden.

Formel 2: Resultierende Standardabweichung nach Fehlerfortpflanzungsgesetz bei der Addition von Variablen

$$s_{ges} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (s_i \cdot x_i)^2}}{\sum_{i=1}^n x_i}$$

mit

s_{ges}	-	Gesamte relative Standardabweichung des Additionsresultates
s_i	-	Relative Standardabweichung der Summanden i
x_i	-	Werte der Summanden i
n	-	Stichprobenanzahl [#]

Formel 3: Resultierende Standardabweichung nach Fehlerfortpflanzungsgesetz bei der Multiplikation von Variablen

$$s_{ges} = \sqrt{\sum_{i=1}^n s_i^2}$$

mit

s_{ges}	-	Gesamte relative Standardabweichung des Multiplikationsresultates
s_i	-	Relative Standardabweichung der Faktoren i in % des Mittelwertes
n	-	Stichprobenanzahl [#]

Die Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes demonstriert das generelle Verhalten der Unsicherheiten bei Aggregation und Desaggregation:

- ▶ Bei der Multiplikation von Variablen nimmt die relative Unsicherheit generell mit zunehmender Anzahl Faktoren zu. Dies ist beispielsweise bei der Desaggregation auf detailliertere Ebenen (z. B. Multiplikation von Gesamtfahrleistungen mit Anteilen je Altersklasse oder je Verkehrssituation) der Fall.

- Bei der Addition von Variablen nimmt die absolute Unsicherheit generell mit zunehmender Anzahl von Summanden zu. Dies ist bei der Aggregation der berechneten Emissionen der Fall, da hier die Emissionen z. B. einzelner Fahrzeugschichten oder Verkehrssituationen summiert werden.

1.2.3 Vorgehen in der vorliegenden Studie

Für die vorliegende Studie müssen die Unsicherheiten sowohl auf der aggregierten Ebene der Energieträger, für welche Absatzzahlen vorliegen, als auch auf differenzierten Ebenen berechnet werden (Abbildung 6). Letztere sind notwendig,

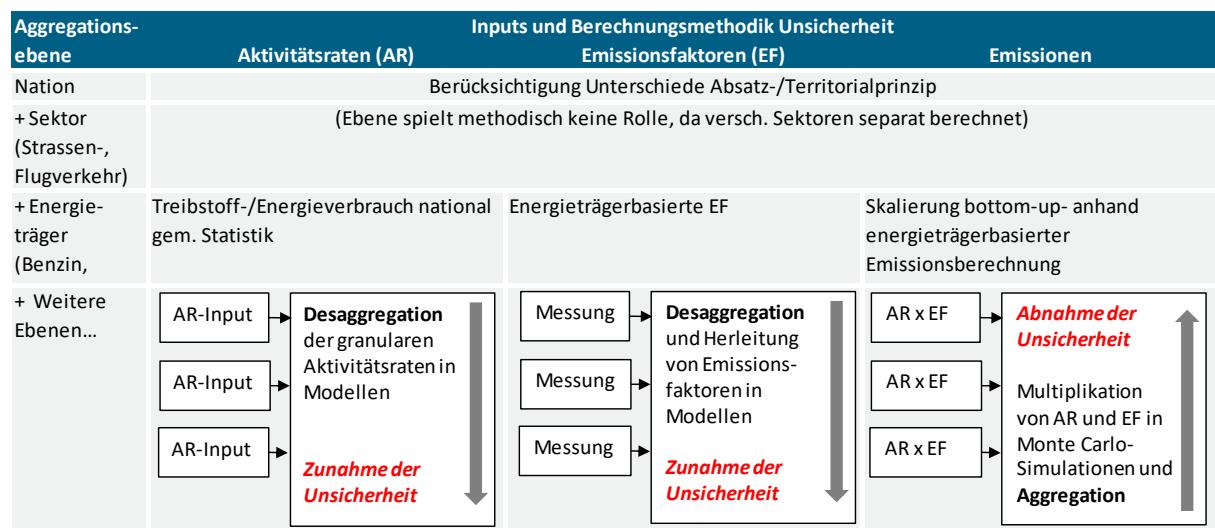
- erstens, weil das ZSE sie zumindest teilweise differenziert (für den Straßenverkehr werden Emissionsarten, Fahrzeugkategorien, Antriebstechnologien, Straßenkategorien und Euro-Abgasstandards unterschieden; für den Flugverkehr sind es Emissionsarten, Kraftstoffart, Zielflughafen und Flugphase);
- und zweitens, weil die Anpassungsfaktoren für die Berücksichtigung der Unterschiede zwischen dem Absatz- und dem Territorialprinzip auf der obersten (nationalen) Ebene aus dem Verhältnis zwischen den anhand der Absätze einerseits, und anhand Bottom-Up-Modellen andererseits berechneten Verbräuchen hergeleitet werden.

Die Inputs für die granularen Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren liegen auf verschiedenen Ebenen vor. Diese werden in Modellen desaggregiert: Für den Straßenverkehr geschieht dies für die Aktivitätsraten im Flottenmodell des HBEFA und für die Emissionsfaktoren im Detail-Emissionsmodell PHEM. Die granularen Aktivitätsraten sowie die Emissionsfaktoren des Flugverkehrs sind in TREMOD-AV zusammengefasst.

Durch diese Zerlegung bis auf die Ebene der Basis-Emissionsfaktoren nimmt die Unsicherheit der granularen Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren gemäß dem Fehlerfortpflanzungsgesetz zu (siehe vorangehendes Kapitel). Bei der anschließenden Emissionsberechnung aus Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren und der Aggregation auf die im ZSE abgedeckten Ebenen nimmt die Unsicherheit wieder ab (siehe Abbildung 6).

Da sich die Zu- und Abnahme der Unsicherheit mit Desaggregation und Aggregation teilweise kompensieren, ist es möglich, dass die Gesamtunsicherheit auf der Zielebene des ZSE durch die Berücksichtigung der detaillierteren Ebenen in den Modellen erhöht oder auch reduziert wird. Der Idealfall wäre natürlich, dass die detaillierte Modellierung auch zu einer Reduktion der Unsicherheit auf Ebene ZSE führt. Ob dies tatsächlich der Fall ist, ist aber schlussendlich nicht relevant, weil die detaillierte Modellierung ja aufgrund anderer Anforderungen betrieben wird, beim HBEFA z.B. die Berechnung von Emissionen auf Straßenabschnittsebene (also differenziert nach Verkehrssituationen und Längsneigungen) als Input für Immissionsmodelle.

Abbildung 6: Generalisiertes Vorgehen bei der Unsicherheitsanalyse der Emissionen des Straßen- und Flugverkehrs



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS.

2 Straßenverkehr

2.1 Übersicht Methodik

2.1.1 Das Zentrale System der Emissionen (ZSE)

Zur Erfüllung der internationalen Berichtspflichten unterhält das Umweltbundesamt das Zentrales System der Emissionen (ZSE). Neben den Treibhausgasen (z. B. CO₂, N₂O) werden im ZSE auch Schadstoffemissionen (z. B. NO_x, SO₂) erfasst. Unterschieden wird nach der Quellgruppe der Emissionen. Im Rahmen der Studie werden hier neben der Quellgruppe „Ziviler Flugverkehr“ (1.A.3.a und 1.D.1.a) auch der „Straßenverkehr“ (1.A.3.b) betrachtet.

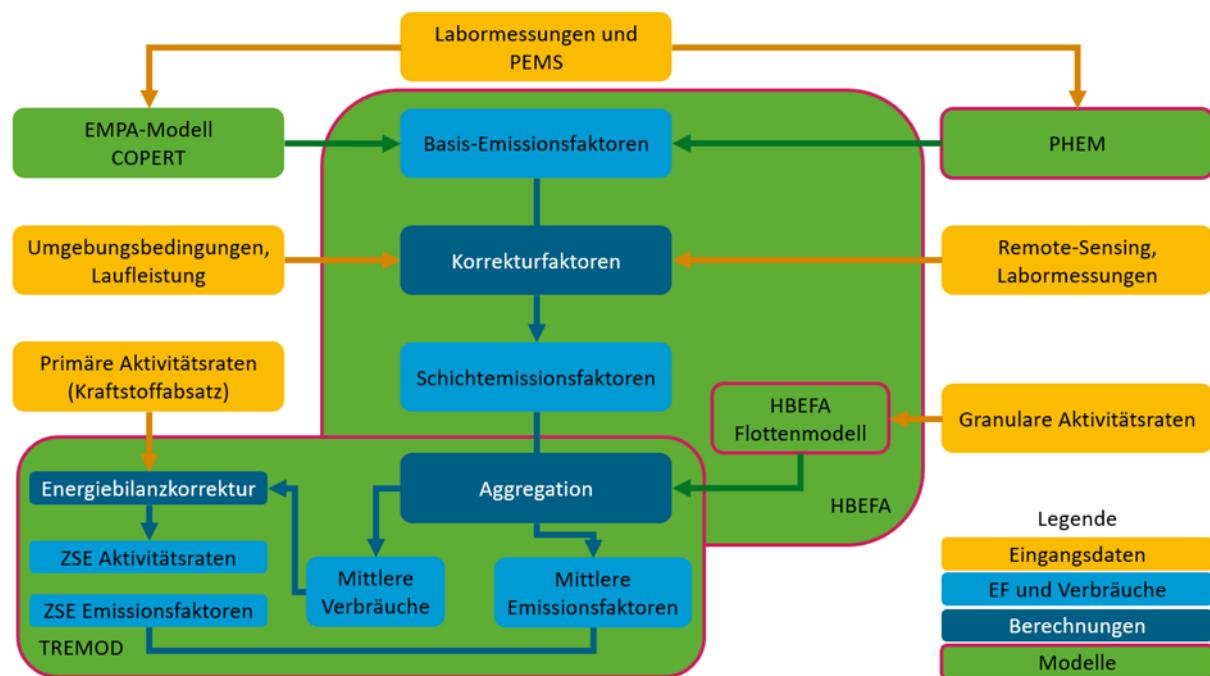
Ausgangspunkt für die Ermittlung der Emissionen des Straßenverkehrs ist der jährliche Kraftstoffabsatz in Deutschland. Hierbei werden im ZSE die Kraftstoffarten Diesel, Biodiesel, Erdgas, Biogas, Benzin, Ethanol, LPG und LNG unterschieden.

Der Absatz dieser Kraftstoffe (primäre Aktivitätsrate) wird mit den kraftstoffspezifischen Emissionsfaktoren für bspw. NO_x oder CO multipliziert, um deren absoluten Emissionen zu erhalten. Die nötigen Emissionsfaktoren werden über TREMOD bereitgestellt. Hierfür ist jedoch eine differenzierte Betrachtung nötig, da z. B. pro verbrauchten Liter Benzin bei einem Euro 4 Pkw andere NO_x-Emissionen entstehen als bei einem Euro 6 Pkw. Daher werden im ZSE die Emissionsfaktoren für die o. g. Kraftstoffarten wie folgt differenziert:

- ▶ Fahrzeugkategorie: Bus, LNF, Moped, Motorrad, Pkw, SNF
- ▶ Abgasnorm: Konventionell, Euro 1/I bis Euro 5/V, Euro 6/VI (ab, c, d, d-TEMP)
- ▶ Straßenkategorie: Autobahn, außerorts, innerorts
- ▶ Emissionsart: Antrieb, Verdunstung

Da über Statistiken die primären Aktivitätsraten pro Kraftstoff nur als Summe zur Verfügung stehen, aber nicht in der aufgeführten Differenzierung, ist eine Aufteilung nötig. Diese Aufteilung der Kraftstoffabsätze auf die Kategorien im ZSE erfolgt über TREMOD. Die Berechnung in TREMOD sowie der Zusammenhang von TREMOD mit den beiden Modellen HBEFA und PHEM, die die Datengrundlage für die Emissionsfaktoren in TREMOD darstellen, werden im Folgenden erläutert. Abbildung 7 zeigt den abstrahierten Zusammenhang der Modelle. Die Verknüpfung sämtlicher Eingabegrößen und -modelle ist relevant für die Ermittlung der Unsicherheiten.

Abbildung 7: Abstrahiertes Schema des Modellverbunds PHEM, HBEFA und TREMOD



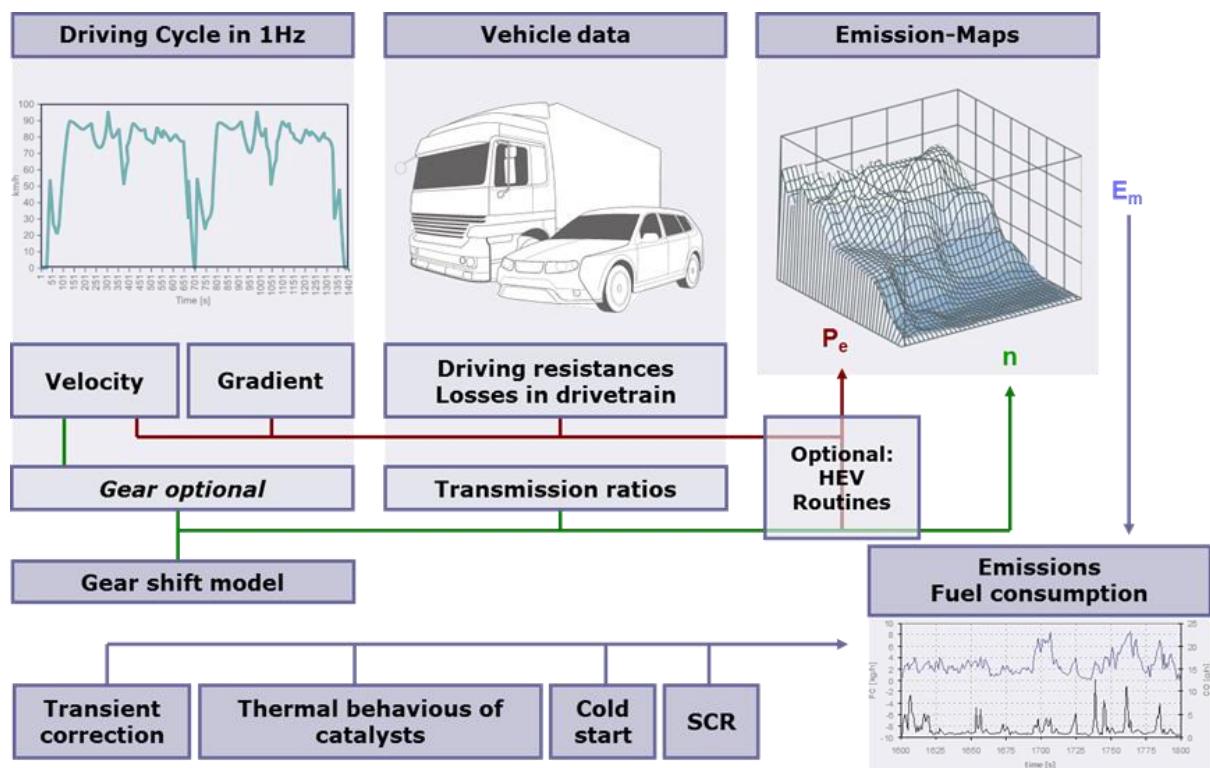
Quelle: Eigene Darstellung, ifeu und INFRAS.

2.1.2 PHEM

PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model) ist ein Emissionsmodell für Kraftfahrzeuge, das auf der Grundlage von Fahrzeuglängsdynamik und Emissionskennfeldern sowohl den Kraftstoffverbrauch als auch die Emissionen von Straßenfahrzeugen für einen bestimmten Fahrzyklus mit einer Frequenz von 1 Hz simuliert, siehe Abbildung 8.

Die Berechnung des Motorleistungsbedarfs erfolgt anhand der Fahrwiderstände und Verluste im Antriebsstrang. Die Motordrehzahl errechnet sich aus Achsantrieb, Reifendurchmesser und Übersetzungsverhältnis unter Berücksichtigung simulierter Schaltvorgänge. Schlussendlich ergeben sich Abgasemissionen und Kraftstoffverbrauch aus den Motorkennfeldern. Durch zusätzliche Korrekturfunktionen wird dabei dem Einfluss transienter Motorlasten berücksichtigt und somit die Genauigkeit der simulierten Emissionen gesteigert. Ebenfalls berücksichtigt wird die Effizienz von Abgasnachbehandlungssystemen in Abhängigkeit von Katalysator-Temperatur und Abgasvolumenstrom. Dies ist insbesondere für die Berücksichtigung von Kaltstarteffekten und der Effizienz von SCR-Systemen relevant. Die Simulation der Abgasnachbehandlungstemperaturen erfolgt dabei über eine 0-dimensionale Wärmebilanz, welche die Wärmeübertragung zwischen Katalysatormaterial und Abgas sowie zwischen Abgasleitung und Außenluft abbildet. Ein implementiertes Fahrermodell liefert zudem realitätsnahe Gangschaltmanöver. (Hiesmayr et al. 2018)

Abbildung 8: Schema des PHEM Modells



Quelle: (Hiesmayr et al. 2018)

Die Berechnung von Geschwindigkeit und Motorleistung aus physikalischen Zusammenhängen ermöglicht die Betrachtung diverser Fahrzustände, variabler Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sowie unterschiedlicher Nutzlasten in Verbindung mit unterschiedlichen Steigungen der Fahrbahn. Ebenso können die Auswirkungen unterschiedlicher Schaltverhalten auf die Emissionen und den Verbrauch ermittelt werden. In PHEM sind für alle relevanten Fahrzeugkategorien „durchschnittliche“ Fahrzeuge hinterlegt. (Hiesmayr et al. 2018)

2.1.3 HBEFA

Das Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr (HBEFA⁵) ist eine Datenbankapplikation für die Abfrage von Emissionsfaktoren für alle relevanten Fahrzeugtypen im Straßenverkehr. Es wurde ursprünglich im Auftrag der Umweltbundesämter von Deutschland, der Schweiz und Österreich erstellt. Inzwischen wird die Entwicklung des HBEFA auch von weiteren Ländern (Schweden, Norwegen, Frankreich) unterstützt. Die erste Version des HBEFA wurde 1995 veröffentlicht; seither folgten Aktualisierungen im Abstand von zwei bis fünf Jahren. Die derzeit aktuelle Version ist HBEFA 4.2 aus dem Februar 2022.

Ziel des HBEFA ist die Bereitstellung von Emissionsfaktoren für verschiedene Anwendungen, von Umweltverträglichkeitsprüfungen (lokale Ebene) über Emissionskataster (Städte, Bundesländer) bis zu nationalen Emissionsinventaren. Entsprechend erlaubt die Methodik mit dem sogenannten Verkehrssituationen-Ansatz eine feine Differenzierung, gleichzeitig erlaubt das HBEFA aber auch die Abfrage stark aggregierter Emissionsfaktoren (z.B. mittlerer Emissionsfaktor der Pkw in Deutschland im Jahr 2019).

⁵ www.hbefa.net

Auf der detailliertesten Ebene unterscheidet das HBEFA hinsichtlich Fahrzeugtypen aktuell 833 sogenannte „**Subsegmente**“ (**Fahrzeugschichten**). Diese sind definiert durch:

- ▶ die Fahrzeugkategorie (z. B. Pkw, Lkw, Krafträder),
- ▶ die Antriebstechnologie (z. B. Otto, Diesel, elektrisch, Plugin-Hybrid etc.),
- ▶ das Emissionskonzept (oder Emissionsklasse, z. B. Euro-6d oder Euro VI),
- ▶ sowie in einigen Fällen unterschiedliche Größenklassen.

Die Ebene „HBEFA-Subsegment“ entspricht somit der drittuntersten Ebene in Abbildung 10. Zu beachten ist hinsichtlich der „Subsegmente“, dass bei

- ▶ Fahrzeugtypen mit „Multi-Technologien“, d. h. diejenigen, welche mit verschiedenen Energieträgern angetrieben werden können (wie Plugin-Hybride oder Flex-Fuel-Fahrzeuge)
- ▶ sowie Fahrzeugen, welche Software-Updates unterzogen werden

die Fahrleistungsanteile mit unterschiedlichen Emissionsfaktoren (also bspw. für den elektrischen und mit Verbrennungsmotor gefahrenen Fahrleistungsanteil, oder vor/nach dem Software-Update) im HBEFA als getrennte Subsegmente implementiert sind, obwohl es sich in der Realität um die gleichen Fahrzeuge handelt.

Hinsichtlich Fahrverhalten unterscheidet das HBEFA aktuell 365 **Verkehrssituationen**, definiert durch:

- ▶ den Umgebungstyp (städtisch vs. ländlich),
- ▶ den Straßentyp (z. B. Autobahn, Hauptverkehrsstraße, Sammelstraße etc.)
- ▶ die Geschwindigkeitsbegrenzungen (z. B. 50 km/h, 80 km/h etc.),
- ▶ sowie den Verkehrszustand („Level of service“, d. h. fünf Klassen von freifließend bis Stau).

Schließlich unterscheidet das HBEFA folgende **Emissionsarten**:

- ▶ Die Emissionsfaktoren für den **betriebswarmen Zustand** („warme Emissionsfaktoren“). Sie werden in g/km ausgegeben und können nach den oben erläuterten Verkehrssituationen differenziert werden.
- ▶ Die **Kaltstartzuschläge** werden in g/Start ausgegeben. Sie werden nicht nach Verkehrssituationen, sondern nach „Umgebungsmustern“ differenziert. Diese beinhalten Fahrlängen- und Standzeitenverteilungen sowie klimatische Bedingungen; pro Land ist im HBEFA ein Standard-Umgebungsmuster hinterlegt, es können aber auch alternative Muster gewählt werden.
- ▶ Bei den **Verdampfungsemissionen** (welche nur Kohlenwasserstoffe betreffen) werden drei Unterarten unterschieden:
 - Die Emissionen nach dem Warmabstellen (angegeben in g/Stopp).
 - die Tankatmung (in g/Fahrzeug und Tag)
 - die Verdampfungsverluste während der Fahrt (in g/km).

Die Verdampfungsemissionen werden ebenfalls nicht nach Verkehrssituationen, sondern nach Umgebungsmuster sowie im Fall der Verluste während der Fahrt nach den Straßenkategorien (Autobahn, außerorts, innerorts) differenziert.

Tabelle 1 zeigt die Anteile der im obigen Absatz beschriebenen Emissionen an den gesamten Straßenverkehrsemissionen in Deutschland im Jahr 2019. Für die meisten Schadstoffe und den Energieverbrauch dominieren die betriebswarmen Emissionen; bei einigen Schadstoffen, z. B. den Kohlenwasserstoffen (HC), spielen aber auch Kaltstartzuschläge und Verdampfungsemissionen eine wichtige Rolle. Die Relevanz der Kaltstartzuschläge nimmt überdies mit der Zeit zu, da die Emissionsgesetzgebung dazu geführt hat, dass v. a. die betriebswarmen Emissionen reduziert wurden, während die Wirkung der Katalysatoren auf die Kaltstartemissionen beschränkter ist. Insgesamt sind aber die betriebswarmen Emissionen die wichtigste Emissionsart, weswegen darauf auch im vorliegenden Projekt der Hauptfokus gelegt wird.

Tabelle 1: Anteil der Emissionsarten an den Straßenverkehrsemissionen in Deutschland, 2019

Emissionsart	Energie-verbrauch	NO _x	PM	HC	CO
Betriebswarme Emissionen	97%	97%	93%	29%	69%
Kaltstart-zuschläge	3%	3%	7%	55%	31%
Verdampfung	0%	0%	0%	17%	0%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%

Die im HBEFA enthaltenen Emissionsfaktoren werden je nach Emissionsart und Schadstoff auf unterschiedliche Weise hergeleitet:

- Die **betriebswarmen Emissionsfaktoren der regulierten Schadstoffe NO_x, PM, HC und CO, sowie der Energieverbrauch**, basieren auf Messungen verschiedener europäischer Labors (sowohl auf dem Rollenprüfstand wie auf der Straße), welche in der Datenbank „DBEFA“ gesammelt werden. Im PHEM-Modell (Abschnitt 2.1.2) der TU Graz werden aus diesen Messungen für alle relevanten Subsegmente Verbrauchskennfelder hergeleitet, d. h. Emissionsintensitäten in Funktion von Motordrehzahl und Drehmoment. Für jede im HBEFA definierte Verkehrssituation und jede Fahrzeugkategorie liegt zudem ein typisches Fahrprofil vor, welches aus einer Vielzahl von GPS-Aufzeichnungen als repräsentativ ausgewählt wurde. Das PHEM-Modell berechnet aus Fahrprofil und Fahrzeugdaten den Leistungsbedarf und die Motordrehzahl und interpoliert die Emissionen aus Motorkennfeldern mit Korrekturen für Eigenheiten der Abgasnachbehandlung für jede Kombination von Subsegmenten und Verkehrssituationen sowie für 7 Längsneigungsklassen die entsprechenden **Basis-Emissionsfaktoren** (Matzer et al. 2019).
- Die **betriebswarmen Emissionsfaktoren nicht-regulierter Schadstoffe** stammen teilweise aus der Auswertung von in der DBEFA gesammelten Messungen, siehe z. B. (Notter et al. 2019). CH₄ und NMVOC werden als Anteile der nach obenstehender Methodik hergeleiteten Kohlenwasserstoffe (HC) und NO₂ als Anteil der nach obenstehender Methodik hergeleiteten NO_x berechnet. Pb- und SO₂-Emissionen werden basierend auf den länderspezifischen Treibstoffqualitäten berechnet. Die restlichen Emissionsfaktoren werden

aus der Tier-3-Methodik des EMEP/EEA Emission Inventory Guidebooks 2019 (Ntziachristos und Samaras 2019) übernommen. Die Emissionsfaktoren der meisten nicht-regulierten Schadstoffe können nicht nach Verkehrssituationen, sondern nur auf höheren Aggregationsebenen, meist nach Emissionskonzept und Straßenkategorie, differenziert werden.

- ▶ Die Emissionsfaktoren für die **Kaltstart-Zuschläge** werden, basierend auf in der DBEFA gesammelten Messungen, nach einem durch die EMPA im EU-Projekt „Artemis“ entwickelten Methodik (ARTEMIS 2007) und ebenfalls unter Berücksichtigung der Standzeiten- und Fahrlängenverteilung sowie der klimatischen Bedingungen berechnet.
- ▶ Die **Verdampfungs-Emissionsfaktoren** werden nach der Methodik des Modells COPERT bzw. der EMEP/EEA (Mellios et al. 2019) ebenfalls unter Berücksichtigung der Standzeiten- und Fahrlängenverteilung sowie der klimatischen Bedingungen berechnet.
- ▶ Das HBEFA nimmt verschiedene **Korrekturen** der Basis-Emissionsfaktoren vor:
 - Der Energieverbrauch und davon hergeleitete Schadstoffe werden mit einem **Effizienz-Korrekturfaktor** multipliziert, welcher die Energieeffizienz der Neufahrzeuge pro Antriebstechnologie, Größenklasse, Jahr und Land, sowie Abweichungen der durchschnittlichen Fahrzeuggröße vom HBEFA-Referenzfahrzeug berücksichtigt.
 - Die **Katalysatoralterung** wird mittels auf Remote-Sensing-Messungen (z.B. (Jenk 2017)) basierenden Korrekturfaktoren berücksichtigt. Die Berechnung dieser Korrekturfaktoren benötigt die durchschnittliche Laufleistung (Kilometerstand) pro Subsegment und Referenzjahr als Eingangsparameter.
 - Für dieselbetriebene leichte Motorwagen wird zusätzlich eine Korrektur der NO_x-Emissionen basierend auf der **Umgebungstemperatur** vorgenommen, welche die Zunahme der NO_x-Emissionen bei niedrigen Temperaturen berücksichtigt. Diese resultierte v.a. bei Euro-5 bis -6ab-Fahrzeugen aus der Optimierung der Abgasnachbehandlung auf die NEFZ-Typprüfungsbedingungen, namentlich die Temperatur zwischen 20 und 30°C (was zum sogenannten Dieselskandal führte).
- ▶ Emissionsfaktoren **nicht direkt gemessener Fahrzeugschichten** werden im HBEFA mittels Korrekturfaktoren (ggf. differenziert nach Straßenkategorie, d. h. Autobahn, außerorts, innerorts) hergeleitet.

Die **Aggregation** der Emissionsfaktoren auf höhere Ebenen erfolgt durch gewichtete Mittelung, wobei die jeweiligen Aktivitätsraten, auf welche sich die Emissionsfaktoren der verschiedenen Emissionsarten beziehen, die Gewichte darstellen: Die Fahrzeugkilometer für die betriebswarmen Emissionsfaktoren sowie die Verdampfungsverluste während der Fahrt, die Bestände für die Tankatmung und die Anzahl Starts bzw. Stopps für die Kaltstartzuschläge und die Verdampfungsemisionen beim Warmabstellen.

Die Aktivitätsraten (Fahrleistungen, Bestände, Starts und Stopps) unterscheiden sich natürlich nach Land und Referenzjahr. Außerdem liegen sie in den Datenquellen (z.B. nationale Statistiken, Fahrzeugregistrierungsdatenbanken etc.) nicht in der benötigten Differenzierung nach HBEFA-Subsegmenten und -Verkehrssituationen vor. Daher enthält die Expertenversion des HBEFA ein **Flottenmodell**, welches die Input-Aktivitätsdaten für die geführten Länder und Referenzjahre nach HBEFA-Subsegmenten desaggregiert (siehe Kapitel 2.2.2.2). Die Anteile Verkehrssituationen an den Fahrleistungen der verschiedenen Fahrzeugkategorien werden zudem als externer Input benötigt, siehe (Universität Stuttgart et al. 2022).

2.1.4 TREMOD

In TREMOD wird das Verkehrsmengengerüst für den Straßenverkehr in Deutschland aufbereitet, also die Fahrzeugbestände und Fahrleistungen sowie weitere Aktivitätsdaten, die für die Hochrechnung der Emissionen benötigt werden. Diese sind identisch mit den Aktivitätsdaten, die in HBEFA verwendet werden (siehe Beschreibung in Kapitel 2.1.3.). Alle Daten werden in hoher Auflösung aufbereitet und mit den detaillierten Emissionsfaktoren aus dem HBEFA verknüpft. Für die Berichterstattung werden die Emissionen jährlich für das vorangegangene Jahr aktualisiert.

Für das ZSE werden die Ergebnisse von TREMOD wie folgt aggregiert und umgerechnet:

1. Zusammenfassung der TREMOD-Ergebnisse zu ZSE-Kategorien:
In TREMOD werden zwölf Fahrzeugkategorien unterschieden, die zu sechs ZSE-Fahrzeugkategorien zusammengefasst werden. Außerdem werden im ZSE einige Subsegmente zusammengefasst, z. B. alle Stufen vor Euro 1 zu „konventionell“ oder Unterkategorien einzelner Eurostufen, z. B. AGR und SCR bei den SNF Euro V (siehe Kapitel 1.1).
2. Berechnung von kraftstoffbezogenen Emissionsfaktoren für alle ZSE-Kategorien:
Die kraftstoffbezogenen Emissionsfaktoren werden aus den zu ZSE-Kategorien aggregierten Emissionen bezogen auf den Energieverbrauch der aggregierten Kategorien berechnet.
3. Korrektur der Ergebnisse für den Energieverbrauch je Energieträger und ZSE-Kategorie auf den Kraftstoffabsatz für jedes Bezugsjahr (siehe unten).

Grundlage für die Emissionsfaktoren ist die aktuelle Version des HBEFA. In dieser Studie wird, wie schon erwähnt, die HBEFA-Version 4.2 verwendet. Diese enthält das Verkehrsmengengerüst für 2019 aus der aktuellen TREMOD-Version 6.23, welches die Datengrundlage für die Aktivitätsdaten des Straßenverkehrs in dieser Untersuchung ist. Das HBEFA 4.2 enthält somit alle aktuellen Informationen, die für die Bestimmung der Unsicherheiten 2019 in Schritt 1 und 2 erforderlich sind. Die Berechnung der Unsicherheiten der Emissionen des Straßenverkehrs für Schritt 1 und 2 wird daher in diesem Projekt auf Basis des HBEFA 4.2 durchgeführt.

Aus TREMOD werden die ZSE-spezifischen Berechnungsschritte in die Unsicherheitenrechnung übernommen, die nicht Bestandteil des Abgleich der Aktivitätsdaten (Energieverbrauch je Energieträger) aus der Inlandsberechnung mit den Absatzzahlen (Schritt 3). Dazu werden Anpassungsfaktoren wie folgt ermittelt:

- ▶ Ottokraftstoff wird überwiegend von Pkw verbraucht (97 %), gefolgt von KR, LNF und übrigen Kfz (Leichtverkehr). 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 könnten, unabhängig von der Antriebsenergie.
- ▶ Der Anpassungsfaktor für die übrigen dieselbetriebenen Fahrzeugkategorien des Schwerverkehrs (Schwere Nutzfahrzeuge und Busse) berechnet sich aus den verbleibenden Differenzen zum gesamten Inlandsverbrauch bzw. zum gesamten Inlandsabsatz des Straßenverkehrs nach Energiebilanz.

Die folgende Tabelle zeigt die Aktivitätsdaten sowie die verwendeten Korrekturfaktoren für Benzin und Diesel im Straßenverkehr 2019.

Tabelle 2: Vergleich Verbrauch im Inland (Modellergebnis TREMOD) und Absatz (Energiebilanz) für Benzin und Diesel im Straßenverkehr 2019

	Benzin- verbrauch im Inland (PJ)	Benzinabsatz im Inland (PJ)	Differenz Absatz/ Verbrauch	Diesel- verbrauch im Inland (PJ)	Dieselabsatz im Inland (PJ)	Differenz Absatz/ Verbrauch
LV	839	730	-13%	945	822	-13%
SV	0	0	0	707	648	-8%
Gesamt	839	730	-13%	1652	1470	-11%

Quellen: TREMOD 6.23 vom 20.12.2021, AG Energiebilanzen, BAFA. Anmerkungen: Ottokraftstoffe inkl. Ethanol, Dieselkraftstoffe Straßenverkehr inkl. Biodiesel (rein und Beimischung) und Pflanzenöl; LV: Leichtverkehr (Pkw, motorisierte Zweiräder, leichte Nutzfahrzeuge); SV: Schwerverkehr (schwere Nutzfahrzeuge, Busse).

2.1.5 Unsicherheiten Straßenverkehr

Die Methodik für die Herleitung der Unsicherheiten der Emissionsfaktoren und Aktivitätsraten des Straßenverkehrs orientiert sich am generellen, in Kap. 1.2.3 erläuterten Vorgehen. Für den Straßenverkehr müssen die Aggregationsebenen bis hinunter auf die detaillierteste Ebene berücksichtigt werden, also die Ebene der nach HBEFA-Subsegmenten, Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen differenzierten betriebswarmen Basis-Emissionsfaktoren (Abbildung 9).

Für die schweren Nutzfahrzeuge werden zusätzlich drei Beladungsklassen mit je unterschiedlichen Emissionsfaktoren unterschieden. Da für den Anteil der Fahrzeugkilometer in jeder Beladungsklasse aber weder empirische Eingangsdaten noch entsprechende Unsicherheiten vorliegen, werden die Anteile überall als ein Drittel der jeweiligen Fahrleistung angenommen – was auf das Gleiche hinausläuft, wie den Emissionsfaktor für die mittlere Beladungsklasse zu verwenden. Für die Unsicherheitsberechnung würde die Desaggregation und anschließende Aggregation keinen Erkenntnisgewinn bringen, da aufgrund der unbekannten Unsicherheit der Fahrleistungsanteile nach Beladungsklasse trotzdem unklar bleiben würde, ob die Unterscheidung der Beladungsklassen im HBEFA die Gesamtunsicherheit erhöht oder verringert.

Da weder die Inputdaten für die Aktivitätsraten noch die Emissionsmessungen auf dieser Ebene differenziert sind, findet eine **Desaggregation** statt:

- ▶ Das HBEFA-Flottenmodell desaggregiert die auf verschiedenen Ebenen vorliegenden Inputdaten zu Beständen und Fahrleistungen nach HBEFA-„Subsegmenten“ und Straßenkategorien (sowie, im Fall der schweren Nutzfahrzeuge, nach Beladungsklassen). Die nach Straßen- und Fahrzeugkategorien differenzierten „TSGrad-Patterns“ splitten die Fahrleistungen weiter nach HBEFA-Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen auf.
- ▶ Das PHEM-Modell zerlegt die Emissionsmessungen durch die Herleitung von Kennfeldern („Emission maps“) und die Anwendung der Fahrprofile der HBEFA-Verkehrssituationen ebenfalls auf die Ebene der Basis-Emissionsfaktoren.

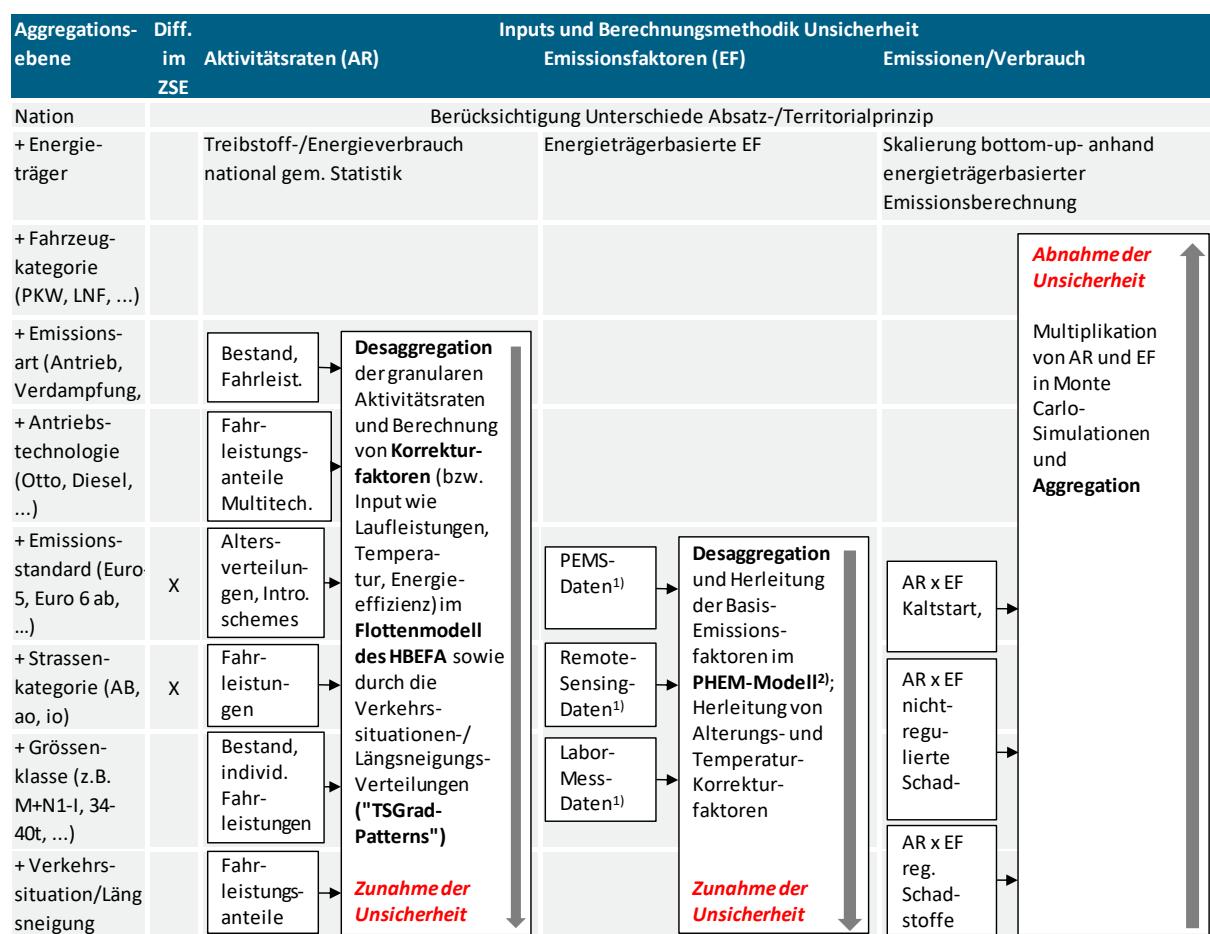
In diesen Desaggregationsschritten nimmt die Unsicherheit nach den in Kapitel 1.2 erläuterten Prinzipien erwartungsgemäß zu.

Die Ziel-Aggregationsebene des vorliegenden Projektes entspricht derjenigen des ZSE – d. h., es werden Fahrzeugkategorien, Emissionsarten, Antriebstechnologien, Emissionskonzepte und, für die betriebswarmen Emissionen, auch Straßenkategorien unterschieden (auch wenn sich die Ausprägungen auf den verschiedenen Gliederungsebenen leicht vom HBEFA unterscheiden,

siehe Kapitel 2.1.1 und 2.1.3). D. h., **die Emissionsfaktoren werden für das ZSE wieder aggregiert**. Außerdem werden die Emissionsfaktoren im ZSE nicht auf die gleichen, granularen Aktivitätsraten bezogen wie im HBEFA (also g/km, g/Start etc.), sondern in g/MJ Energieverbrauch ausgedrückt. Die Aktivitätsraten werden zudem mit dem Verhältnis des modellierten Verbrauchs zum Kraftstoffabsatz gemäß Statistik korrigiert. Da letzterer auf Ebene der Energieträger vorliegt, muss auch die Unsicherheit des modellierten Verbrauchs auf dieser Ebene berechnet werden, um die Unsicherheit der Korrekturfaktoren korrekt herzuleiten.

In den entsprechenden Aggregationsschritten werden die Emissionen auf den einzelnen Aggregationsebenen summiert, infolgedessen ist eine Abnahme der Unsicherheit in diesen Schritten zu erwarten.

Abbildung 9: Überblick über das Vorgehen bei der Unsicherheitsanalyse der Emissionen des Straßenverkehrs



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkungen: ¹⁾ Die Messdaten lassen sich nicht einer genauen Ebene zuordnen. Sie erstrecken sich je nach Zyklus oder gefahrener Strecke über mehrere Ebenen; oder werden im Fall von RS-Daten je nach Datenverfügbarkeit zusammengefasst. ²⁾ Das PHEM-Modell produziert die betriebswarmen Basis-Emissionsfaktoren der regulierten Schadstoffe und des Verbrauchs. Nicht-regulierte Schadstoffe sowie Kaltstartzuschläge und Verdampfungs-Emissionsfaktoren werden nach anderer Methodik hergeleitet.

2.2 Eingangs-Aktivitätsraten

2.2.1 Primäre Aktivitätsraten – Kraftstoffabsatz

Die Aktivitätsraten der Quellgruppen 1.A.3.b entsprechen im ZSE dem in den Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland dokumentierten Endenergieverbrauchs des Sektors

„Straßenverkehr“ (Energiebilanzzeile 62). Üblicherweise wird der Wert in Masseinheiten (z. B. Tonnen bei flüssigen Kraftstoffen) oder Energieeinheiten (z.B. Terajoule (TJ)) angegeben. Die Gesamtmengen für die Emissionsberichterstattung werden den Mineralölstatistiken des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), die auf Angaben des Mineralölwirtschaftsverbands (seit November 2021 en2x – Wirtschaftsverband Fuels und Energie) zurückgehen, entnommen.

Sie werden in ZSE aufgeteilt in die Strukturelemente und damit je Energieträger bzw. Antriebsenergie unterteilt nach Fahrzeugkategorien, Straßenkategorien und Eurostufen.

Bei der Ableitung der Aktivitätsraten müssen demnach Bottom-up- und Top-down-Berechnungen kombiniert werden. Dabei sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

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

Die Differenz zwischen den mit TREMOD bottom-up berechneten Verbräuchen und den Absatzzahlen nach Energiebilanz wird durch Anpassungsfaktoren ausgeglichen (siehe Kapitel 2.1.4). Diese Korrekturfaktoren berücksichtigen u. a. durch folgende Einflussfaktoren verursachte Differenzen:

1. Allgemeine Unterschiede in der Bilanzierung:
 - räumliche Differenzen: Betankungsort und Verbrauchsort unterscheidet sich
 - zeitliche Differenzen zwischen Betankung und Verbrauch (Jahreswechsel)
2. Unsicherheiten bei der Erfassung der Kraftstoffabsätze für den Straßenverkehr:
 - Unterschiede in den Heizwerten der Kraftstoffe
 - unvollständige Erhebung der Absatzmenge
 - Messungenauigkeiten
 - Zuordnungsdifferenzen der Energiebilanz (z. B. Kraftstoffmengen, die in der Energiebilanz dem Straßenverkehr zugeordnet, aber nicht im Straßenverkehr verbraucht wurden)
3. Unsicherheiten des Fahrleistungs- und Flottenmodells (inkl. Eingangsdaten):
 - Ermittlung der Gesamtfahrleistung je Fahrzeugkategorie und Aufteilung auf die Straßenkategorien,
 - Anteile verschiedener Verkehrssituationen/Längsneigungsklassen an der Fahrleistung
 - Bestimmung der Fahrleistungsanteile der einzelnen Fahrzeugschichten (Antrieb, Größenklasse, Alter, Emissionsstandard)
 - spezifischer Energieverbrauch der Fahrzeugschichten je Verkehrssituation.

Unter Punkt 1 sind Aspekte aufgeführt, die einen Unterschied zwischen der Verbrauchsberechnung und dem Kraftstoffabsatz erklären könnten. Bezuglich des ZSE sind jedoch aufgrund der hier verwendeten Methodik beide Punkte für die primären Aktivitätsraten

nicht relevant. Maßgeblich für die berichteten Emissionen eines Landes sind die Kraftstoffabsätze innerhalb eines Jahres. Diese müssen jedoch nicht zwangsläufig den realen Emissionen eines Landes in diesem Jahr entsprechen:

Räumliche Differenzen

Sofern Pkw aufgrund von Kostenvorteilen im Ausland tanken (z. B. Luxemburg), aber der Verbrauch in Deutschland stattfindet, werden die Emissionen dem Land der Betankung zugerechnet, in dem Fall also nicht Deutschland. In diesem Fall lägen die berichteten Emissionen von bspw. Luxemburg über den tatsächlich durch den Straßenverkehr auf luxemburgischem Territorium verursachten Emissionen, während sich Deutschland ein umgekehrter Effekt ergäbe. Der Aspekt könnte aufgrund der in TREMOD verwendeten Methode einen Einfluss auf die Aufteilung des Kraftstoffverbrauchs auf die Verkehrsmittel haben. Wenn bspw. Diesel-Pkw verhältnismäßig weniger im Ausland tanken als Lkw, so würde sich die Aufteilung des Dieselabsatzes auf Lkw und Pkw in der TREMOD-Rechnung (siehe Abschnitt 2.4.2.2) ändern. Dieser Aspekt (Verschiebung der Kraftstoffaufteilung durch Graumarkt) wird jedoch nicht berücksichtigt, da hierzu Statistiken und Modelle fehlen.

Zeitliche Differenzen

Zeitlich können ebenfalls Unterschiede entstehen, wenn z. B., wie bei der Einführung der CO₂-Steuer beim Jahreswechsel 2020/2021, eine Preiserhöhung antizipiert wird. Hier wird vermehrt im Dezember getankt, obwohl der Kraftstoff erst im Folgejahr verbraucht wird und somit erst dann die Emissionen entstehen. Die zeitlichen Unterschiede haben, wie die geographischen Unterschiede, aufgrund der in Kapitel 2.1 beschriebenen Methodik keinen Einfluss die Unsicherheiten der berichteten primären Aktivitätsraten (Kraftstoffabsätze).

Die unter Punkt 2 aufgeführten Unsicherheiten betreffen im Wesentlichen die primären Aktivitätsraten. Zur Bestimmung dieser Unsicherheiten werden die einzelnen Ursachen separat untersucht.

Heizwerte

Benzin ist kein homogenes Produkt. Zum einen bestehen natürliche Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung je nach Rohölherkunft und zum anderen werden auch verschiedene Benzinsorten verwendet, die sich zum Beispiel in ihrer Klopffestigkeit unterscheiden. Demnach variiert auch der Heizwert von Benzin.

Einen Einfluss auf das Ergebnis hat der Heizwert, da Aufteilung der primären Aktivitätsraten auf die Verkehrsarten in TREMOD anhand der Energieverbräuche der Fahrzeuge erfolgt, aber die Statistik des Kraftstoffabsatzes über die Masse gegeben ist.

Um die Bandbreite abschätzen zu können, werden Heizwerte aus der Literatur gegenübergestellt. Tabelle 3 stellt die Werte für Benzin und Diesel dar.

Tabelle 3: Heizwertbandbreite und relative Standardabweichung von Benzin und Diesel

Heizwerte in MJ/kg

Benzin	Diesel	Quelle
42,5	42,8	(BFE 2015)
42,6	43	(BFE 2015)
42,3	43,1	(kfz-tech.de 2013)
42,7	-	(Weclas et al. 2005)
43,5	-	(Weclas et al. 2005)
42,28*	42,65*	(Allekotte et al. 2020)
42,7	42,5	(Böge 2008)
43,3	-	(Böge 2008)
43,5	-	(Böge 2008)
$\sigma = 1,1\%$	$\sigma = 0,3\%$	

Anmerkung: *Werte angenommen in TREMOD. Entspricht den Angaben aus (AG Energiebilanzen o.J.).

Die relative Standardabweichung bezogen auf den Mittelwert liegt im Bereich von 0,3 bis 1,1 %. Bei einem Konfidenzintervall von 95 % ergibt sich eine Bandbreite von 41,9 und 43,9 MJ/kg für Benzin und 42,4-43,2 MJ/kg für Diesel. Da der in TREMOD verwendete Wert nicht dem Mittelwert aus Tabelle 3 entspricht, wird eine Dreiecksverteilung angenommen. Für die sonstigen Energieträger wird vereinfacht eine Standardabweichung von 1 % angenommen (bei Normalverteilung). Da sich die Statistik zum Energieabsatz (primäre Aktivitätsrate) auf die Masse bezieht, die berechneten Verbräuche jedoch in Energieeinheiten [MJ] gegeben sind, ist die Unsicherheit des Heizwertes zu berücksichtigen. Würde der Verbrauch sowohl über die Masse als auch den Energiegehalt exakt passend zueinander statistisch erhoben werden, müsste die Unsicherheit des Heizwertes nicht ermittelt werden.

Unvollständige Erhebung

Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) erhebt nach Mineralöldatengesetz den Gesamtabsatz von Erdölzeugnissen. Da rund 98 % der Erhebungsdaten – also auch der Inlandsabsätze – explizit von den Unternehmen gemeldet werden, geht das BAFA von geringen Unsicherheiten im Gesamtabsatz aus. Inlandsabsätze von kleinen Unternehmen gehen über den Außenhandel als Differenz aus Import und Export in die Statistik ein. (BAFA 2021)

Aufgrund der Angaben des BAFA wird vereinfacht angenommen, dass bei den gemeldeten Mengen eine geringe Standardabweichung von 0,1 % und bei den sonstigen Mengen der Kleinunternehmen eine Standardabweichung von 25 % (Normalverteilung) vorliegt.

Nach der Fehlerfortpflanzung resultiert hieraus eine Standardabweichung für die Erhebung von 0,51 %. Derselbe Wert wird vereinfacht für alle Kraftstoffarten (auch Biokraftstoffe) angenommen.

Messgenauigkeiten

Bei der berichteten Kraftstoffmasse können Abweichungen durch Messgenauigkeiten entstehen. Da Erdölprodukte monetär hochwertige Stoffe sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Messinstrumente eine hohe Messgenauigkeit aufweisen. Die zulässige Toleranz an Tankstellen beträgt nach Richtlinie 2014/32/EU der Europäischen Union einheitlich $\pm 0,5\%$

(Europäisches Parlament und Europäischer Rat 2014, S. 32). Unter Berücksichtigung der Angabe wird eine Standardabweichung von 0,2 % für die Messungenauigkeit angenommen. Aus den Unsicherheiten der Erhebung und der Messung ergibt sich nach der Fehlerfortpflanzung eine Standardabweichung von 0,55 %, die für den Gesamtabsatz verwendet wird.

Zuordnungsungenauigkeiten

Über die BAFA-Statistiken ist zwar der Gesamtabsatz der Mineralölprodukte gegeben, jedoch geht hieraus nicht die Kraftstoffmenge hervor, die explizit im Straßenverkehr eingesetzt wird. Neben dem Straßenverkehr gibt es nicht-straßengebundene mobile Maschinen wie etwa Gabelstapler, Motorboote, Baustellenfahrzeuge, Rasenmäher etc, die einen Teil des Kraftstoffabsatzes verursachen.

Um nun die Kraftstoffmenge, die dem Straßenverkehr zuzurechnen ist, zu ermitteln, werden die folgenden Verbrauchergruppen vom Gesamtabsatz abgezogen:

- ▶ Mobile Maschinen
- ▶ Bahn
- ▶ Binnenschiffe
- ▶ Fahrzeuge des Militärs
- ▶ Seeschiffe und Schiffe der Fischerei

Die absoluten Kraftstoffmengen der genannten Verbrauchergruppen sind über (AG Energiebilanzen o.J.) gegeben. Für die Mobilen Maschinen und die Bahn können Unsicherheiten abgeschätzt werden. Bei den Mobilen Maschinen werden die errechneten Kraftstoffverbräuche aus TREMOD Mobile Maschinen (TREMOT-MM) verwendet und den Werten aus AG Energiebilanz gegenübergestellt. Die folgende Tabelle zeigt die Werte aus TREMOD-MM und aus AG Energiebilanz. Es wird bei der Unsicherheitenanalyse eine Gleichverteilung zwischen den beiden Werten angenommen.

Tabelle 4: Absatz und Verbrauch von Mobilen Maschinen im Jahr 2019

Absatz und Verbrauch in Tonnen.

	Benzin	Ethanol	Diesel	Biodiesel
AG Energiebilanz	207.587	14.217	2.400.417	156.517
TREMOT-MM	131.701	8.892	3.848.838	250.795

Quelle: (AG Energiebilanzen o.J.); TREMOD-MM 5.22.

Bei der Bahn und den Binnenschiffen werden die Unsicherheiten aus (Knörr et al. 2009) verwendet. Hier sind relative Standardabweichungen von 3,8 % für die Bahn und von 23,5 % für die Binnenschiffahrt (bei Normalverteilung) gegeben. Die verbleibenden zwei Verbrauchergruppen werden statistisch erhoben. Hier werden dieselben relativen Unsicherheiten angenommen wie beim Gesamtabsatz (0,55 %, Normalverteilung). Tabelle 5 zeigt die gesamten Kraftstoffmengen sowie die hiervon abgezogenen Verbrauchergruppen nach AG Energiebilanz.

Tabelle 5: Zuordnung des Absatzes auf den Straßenverkehr nach AG Energiebilanz

Zuordnung des Absatzes in Kilotonnen.

	Benzin	Ethanol	Diesel	Biodiesel
Absatz	17.034	1.150	35.835	2.301
Mobile Maschinen	208	14	2.400	157
Bahn	-	-	224	15
Binnenschiffe	-	-	178	-
Militär	54	4	20	0,4
Seeschiffe und Fischerei	-	-	339	-
Straße (Rest)*	16.773	1.132	32.674	2.129

Quelle: Mittel aus (AG Energiebilanzen o.J.).

Anhand der beschriebenen Unsicherheiten bei der Erhebung, der Messung, den Heizwerten und der Sektorenzuordnung kann eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt werden. Da hier unterschiedliche Verteilungsfunktionen angenommen werden, erhält man bei der Analyse keine Normalverteilung. Zur Ermittlung der Unsicherheiten der Absatzmenge, die dem Straßenverkehr zugeordnet wird, wird das 95%-Konfidenzintervall aus der Monte-Carlo-Simulation herangezogen. Hieraus ergeben sich die Ober- und Untergrenzen aus Tabelle 6. Zusätzlich wird hier auch der Wert aus TREMOD angegeben.

Tabelle 6: Unsicherheit bzgl. der Zuordnung des Absatzes auf den Straßenverkehr

Zuordnung des Absatzes in PJ.

	Benzin	Ethanol	Diesel	Biodiesel
U _{min}	703,6	29,9	1.328,6	75,0
U _{max}	734,7	31,2	1.403,9	80,1
TREMOD	709,2	30,2	1.393,5	79,3

Quelle: Eigene Berechnung, ifeu.

Aus der Berechnung ergeben sich die folgenden relativen Unsicherheiten:

- U_{min} = -0,8 % und U_{max} = +3,6 % für Benzin,
- U_{min} = -1,1 % und U_{max} = +3,5 % für Ethanol,
- U_{min} = -4,7 % und U_{max} = +0,7 % für Diesel,
- U_{min} = -5,5 % und U_{max} = +1,1 % für Biodiesel.

Für die vier genannten Energieträger wird eine Dreiecksverteilung angenommen.

Da für LPG, Erdgas und Biogas keine Unsicherheiten ermittelt werden können, wird hier vereinfacht eine relative Unsicherheit von 2,5 % angenommen (normalverteilt).

Die Unsicherheiten unter Punkt 3 resultieren zum einen aus den granularen Aktivitätsraten (Verkehrsmengen) und zum anderen aus den spezifischen Verbrauchswerten, die nach der

gleichen Methode ermittelt werden wie die Emissionsfaktoren (siehe Abschnitt 2.2.2.2). Details zur Berechnung dieser Unsicherheiten sind dort beschrieben.

2.2.2 Granulare Aktivitätsraten – Verkehrsmengen und Energieeffizienz

2.2.2.1 Inputdaten

Für die Aufteilung der primären Aktivitätsraten (Kraftstoffabsatz) auf die Verkehrsmittel sind die Verkehrsmengen und die Energieeffizienz relevant. Die Verkehrsmengen setzen sich aus einer Vielzahl an Größen zusammen und werden in TREMOD mit den spezifischen Kraftstoffverbräuchen verrechnet, um so den gesamten Kraftstoffverbrauch pro Verkehrsmittel zu bestimmen. Folgende Größen werden pro Verkehrsmittel berücksichtigt:

- ▶ Bestände
 - absolute Bestände
 - Anteil Antriebstechnologie
 - Anteile Abgasnormen
 - Anteile Partikelfilter und Katalysatoren
- ▶ Fahrleistung
- ▶ Verkehrssituation
- ▶ Technologieanteile bei Multi-Tech-Fahrzeugen
- ▶ Anzahl Startvorgänge von Fahrzeugen
- ▶ Realverbrauchsfaktoren (Energieeffizienz)

Im Folgenden werden die genannten Punkte erläutert. Die Verkehrsmengen werden mitsamt den Schichtemissionsfaktoren verwendet, um die ZSE-Emissionsfaktoren zu bestimmen.

Bestände – absolute Bestände

Das KBA liefert die Bestände, die für die Berechnung in TREMOD verwendet werden. Hierbei werden jährlich die Bestände zum 01. Januar in einer Sonderauswertung angegeben. Da TREMOD die Emissionen eines gesamten Jahres berechnet, wird hierfür der mittlere Bestand eines Jahres verwendet, welcher vereinfacht durch den Mittelwert der Bestände zum 01. Januar des Betrachtungsjahrs und zum 01. Januar des Folgejahres abgebildet wird. Hierdurch entstehen Unschärfen. Aus einer durchgeführten Analyse der Bestände und Neuzulassungen in den letzten 10 Jahren kann abgeschätzt werden, dass je nach Fahrzeugkategorie eine Standardabweichung von 0,03 bis 0,48 % des absoluten Bestands angesetzt werden kann.

Die folgende Tabelle zeigt die Standardabweichungen. Allgemein weisen Fahrzeugkategorien eine höhere Unsicherheit im absoluten mittleren Bestand auf, die durch eine schnellere Flottenerneuerung gekennzeichnet sind. Es wird eine Normalverteilung angenommen. Bei den Beständen wird bei der Altersstruktur davon ausgegangen, dass die Abweichung der prozentualen Anteile genau ist.

Tabelle 7: Unsicherheiten der absoluten Bestände (Jahr 2019)

Fahrzeugkategorie	σ_{relativ}	Relative Unsicherheit
Pkw	0,09 %	0,18 %
KR	0,42%	0,84%
Bus	0,03%	0,07%
SNF*	0,14%	0,27%
Lkw**	0,04%	0,08%
SZ	0,46%	0,92%
LNF	0,48%	0,95%

Anmerkung: *Lkw und SZ werden unter der Fahrzeugkategorie SNF zusammengefasst, **Unter Lkw werden Solo-Lkw und LZ zusammengefasst.

Bestände – Anteile Antriebstechnologie

Das KBA liefert eine gute Datenbasis für die Anteile der Antriebstechnologien. Jedoch kann es auch hier zu geringen Ungenauigkeiten kommen, da in TREMOD z. B. einige Technologien, die in der Statistik gegeben sind, bspw. Wasserstofffahrzeuge, nicht enthalten und in der Statistik einige Fahrzeuge mit der Technologie „Sonstige“ deklariert sind. Hierdurch ergeben sich unterschiedliche prozentuale Aufteilungen bei der KBA-Statistik und in TREMOD. Als Unsicherheiten bzgl. der Antriebstechnologieanteile wurden pro Fahrzeugkategorie jeweils der Minimal- und Maximalwert aus der Statistik und dem in TREMOD verwendeten Wert genommen. Die folgende Tabelle zeigt die untere und obere Grenze sowie, in Klammern, den in TREMOD verwendeten Referenzwert. Da keine Normalverteilung vorliegt, wird eine Dreiecksverteilung angenommen.

Tabelle 8: Ober- und Untergrenze der Antriebstechnologieanteile pro Fahrzeugkategorie (Jahr 2019)

	Pkw	KR	Bus	Lkw/LZ	SZ	LNF
Benzin	65,9 – 66,7% (66,6%)	99,5 – 99,8% (99,8%)	/	/	/	5,39 – 5,68% (5,68%)
Diesel	31,9 – 32,7% (32,0%)	/	97,1 – 98,3% (97,4%)	99,6 – 99,7% (99,7%)	99,6 – 99,8% (99,8%)	93,0 – 93,1% (93,1%)
Gas*	0,98 – 1,00% (0,98%)	/	1,32 – 1,40% (1,32%)	0,12 – 0,27% (0,12%)	0,21 – 0,38% (0,23%)	0,49 – 1,07% (0,49%)
Elektro	0,23 – 0,25% (0,23%)	0,25 – 0,38% (0,25 %)	0,38 – 0,41% (0,38%)	0,17 – 0,17% (0,17%)	0,00 – 0,18% (0,00%)	0,75 – 0,75% (0,75%)
Plug-In	0,18 – 0,20% (0,18%)	/	/	/	/	0,00 – 0,00% (0,00%)
Hybrid	/	/	0,93 – 1,01% (0,93%)	/	/	/

Anmerkungen: *LPG und CNG hier zusammengefasst, in der TREMOD-Berechnung werden diese jedoch getrennt betrachtet; Mit „/“ werden Technologien angegeben, die in TREMOD für das Jahr nicht definiert sind. Hybrid (ohne PHEV) werden bei allen Fahrzeugkategorien außer bei Bussen den Benzin- bzw. Diesel-Fahrzeugen zugeordnet.

In der Analyse können nicht alle Unsicherheiten bzgl. der Antriebstechnologien berücksichtigt werden, weil in TREMOD nicht alle Technologien pro Fahrzeugkategorie definiert sind (z. B. PHEV bei SZ). Jedoch weisen diese Technologien einen sehr geringen Anteil auf, sodass der Fehler vernachlässigbar ist.

Bestände – Anteile Abgasnormen

Bei den Anteilen der Abgasnormen wird analog zu den Antriebstechnologien vorgegangen. Beim Transfer der Daten der KBA-Statistik zu TREMOD entstehen hier jedoch größere Unsicherheiten, da der Anteil der „Sonstigen“-Emissionsgruppe nach KBA über 2 % beträgt. Die folgende Tabelle zeigt die Ränder der Abgasnormenanteile und, in Klammern, den Referenzwert aus TREMOD. Es wird eine Dreiecksverteilung angenommen.

Tabelle 9: Ober- und Untergrenze der Abgasnormenanteile pro Fahrzeugkategorie (Jahr 2019)

	Pkw	KR	Bus	Lkw/LZ	SZ	LNF*
Euro 1/I	1,22 – 1,25% (1,22%)	8,04 – 27,0% (17,0%)	0,28 – 2,54% (0,64%)	1,79 – 8,31% (1,79%)	0,15 – 0,65% (0,16%)	1,35 – 1,39% (1,36%)
Euro 2/II	3,04 – 6,47% (3,04%)	9,50 – 19,3% (9,50%)	5,03 – 7,35% (5,03%)	6,48 – 18,3% (6,48%)	0,84 – 1,34% (0,86%)	2,91 – 6,20% (2,91%)
Euro 3/III	6,17 – 7,71% (6,17%)	26,8 – 50,7% (28,8%)	13,5 – 16,1% (13,5%)	11,0 – 27,9% (11,0%)	2,66 – 3,20% (2,66%)	8,14 – 10,2% (8,14%)
Euro 4/IV	27,2 – 32,0% (31,2%)	7,49 – 14,5% (7,49%)	5,94 – 8,76% (5,94%)	1,75 – 7,10% (6,81%)	1,30 – 1,80% (1,33%)	20,0 – 23,6% (23,1%)
Euro 5/V	26,4 – 27,2% (26,6%)	/	12,2 – 33,8% (33,0%)	31,4 – 34,4% (31,4%)	15,1 – 20,0% (19,9%)	32,7 – 33,7% (32,9%)
Euro 6/VI	29,4 – 30,2% (29,5%)	/	39,5 – 41,8% (39,6%)	35,9 – 41,0% (36,4%)	74,5 – 75,0% (74,5%)	27,7 – 28,5% (27,8%)

Anmerkungen: *Für LNF werden die relativen Unsicherheiten von Pkw übernommen.

Bestände – Anteile Partikelfilter und Katalysatoren

Aufgrund fehlender Statistiken zu Nachrüstungen von Dieselpartikelfiltern bei Pkw und Bussen sowie bei Bussen und SNF eingesetzte Katalysatortechnologie (AGR, SCR) können hier lediglich eigene Annahmen getroffen werden. Vereinfacht werden die Anteile um 10 Prozentpunkte nach oben und unten variiert. Die folgenden Tabellen zeigen die Maximalwerte (95%-Konfidenzintervall), die für die Unsicherheitenanalyse verwendet werden. Es wird eine Dreiecksverteilung angenommen.

Tabelle 10: Unsicherheiten der Fahrzeuge mit Dieselpartikelfilter (Jahr 2019)

	Minimum	Mittel	Maximum
LBus ≤15t	62%	72%	82%
LBus >15-18t	66%	76%	86%
LBus >18t	79%	89%	99%
Pkw	76%	86%	96%

Tabelle 11: Katalysatortechnologie bei Bussen und SNF Euro IV und V (Jahr 2019)

	Minimum	Mittel	Maximum
AGR	15%	25%	35%
SCR	65%	75%	85%

Fahrleistung

Das Fahrleistungsgerüst fußt in TREMOD zum Großteil auf der Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al. 2016). Hier werden Unsicherheiten bzgl. der absoluten Fahrleistungen angegeben. Eine Analyse dieser Werte führt zu den relativen Standardabweichungen in Tabelle 12. Hier werden bei Lkw auch verbesserte Datenlagen (Mautstatistik) berücksichtigt. Es wird von einer Normalverteilung ausgegangen.

Tabelle 12: Relative Standardabweichung der Fahrleistung (Jahr 2019)

	Gesamte Fahrleistung	Autobahn-anteil	Außenorts-anteil	Innerorts-anteil
Pkw	10%	6%	13%	12%
KR	11%	9%	15%	13%
Bus	17%	9%	21%	19%
SNF*	3%	1%	6%	5%
Lkw ≤7,5t	8%	9%	12%	10%
Lkw >7,5t	5%	0%	10%	6%
LZ/SZ	3%	0%	9%	9%
LNF	9%	5%	12%	11%

Anmerkung: *Lkw und SZ werden unter der Fahrzeugkategorie SNF zusammengefasst.

Der Fahrleistungsanteil auf Autobahnen von Pkw beträgt z. B. 31 %. Bei der oben angegebenen relativen Standardabweichung (6 %) würde sich das 95%-Konfidenzintervall mit 27 bis 35 % ergeben.

Verkehrssituation

Die Verkehrssituationen wurden im (noch laufenden) Projekt „Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung“ (Universität Stuttgart et al. 2022) für Deutschland neu bestimmt und in HBEFA 4.2 implementiert. Insgesamt sind 265 Verkehrssituationen definiert, die sich hinsichtlich Straßenkategorie, Verkehrsfluss, Geschwindigkeit und Steigung unterscheiden. Auf Anfrage beim Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart, die das genannte Projekt durchgeführt hat, konnten keine quantitativen Informationen bzgl. der Unsicherheiten der Anteile der Verkehrssituationen angegeben werden. Aufgrund dieser Datenlücke kann lediglich eine Annahme getroffen werden. Für jede Verkehrssituation wird eine relative Standardabweichung von 10 % bei Normalverteilung angenommen.

Technologieanteile bei Multi-Tech-Fahrzeugen

Als Multi-Tech-Fahrzeug werden hier Antriebstechnologien verstanden, die mehr als einen Energieträger zur Traktion verwenden. Hybridfahrzeuge ohne externe Ladung sind hiervon ausgenommen, da diese lediglich als Effizienzsteigerung eines konventionellen Antriebsstrangs

erachtet werden. Demnach werden die Anteile der Energieträger am Energieverbrauch von CNG- und LPG-Fahrzeugen sowie PHEV betrachtet. Die Bandbreite der Anteile von CNG und LPG werden über Angaben von Spritmonitor zu diesen Antrieben abgeschätzt. Hier liegt bei CNG eine realistische Bandbreite von 90 bis 100 % am Kraftstoffverbrauch von CNG-Fahrzeugen vor. Der verbleibende Energiebedarf wird durch Benzin gedeckt. Bei LPG-Fahrzeugen ist die Bandbreite mit 81 bis 100 % höher. Auch hier stammt die restliche Energie aus Benzin. Für beide Technologien werden Dreiecksverteilungen angenommen. Die Angaben werden gleichermaßen für alle Straßenkategorien einheitlich angenommen.

Für PHEV wurde eine Abschätzung anhand (Jöhrens et al. 2020) vorgenommen. Hieraus wurde eine relative Standardabweichung der elektrischen Fahranteile von 13 % ermittelt. Über das 95%-Konfidenzintervalle pro Straßenkategorie werden die Minimal- und Maximalwerte aus Tabelle 13. Für die Berechnung wird vereinfacht analog zu LPG und CNG eine Dreiecksverteilung angenommen.

Tabelle 13: Unsicherheit der elektrischen Fahranteile von PHEV (Jahr 2019)

	Min	Mittel	Max
AB	8%	11%	14%
AO	26%	36%	46%
IO	32%	44%	56%

Anzahl Startvorgänge von Fahrzeugen

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren weisen ein unterschiedliches Emissionsverhalten auf, wenn der Motor kalt bzw. warm ist. Der Anteil an Kaltphasen pro Fahrzeugkategorie (nur Pkw und LNF) wird über die Anzahl der Startvorgänge ermittelt. In TREMOD werden die Emissionen in der Kaltphase mit anteiligen Emissionen in der Warmphase in die Innerorts-Emissionen eingerechnet. Außerorts und auf Autobahnen liegen lediglich Warmphasen vor.

Die Anzahl an Starts können über die gesamte Fahrleistung geteilt durch die durchschnittliche Fahrdistanz pro Start errechnet werden. In TREMOD ist ein Wert von 14,6 km/Start angenommen. Die Bandbreite der Fahrweite pro Startvorgang wird für Pkw über (Nobis und Kuhnimhof 2019) abgeleitet. Dieselben Werte werden auch für LNF übernommen. Die folgende Tabelle gibt die Werte aus TREMOD sowie die ermittelten Maximalwerte an. Es wird angenommen, dass eine Dreiecksverteilung vorliegt.

Tabelle 14: Anzahl durchschnittliche Fahrweite pro Startvorgang pro Fahrzeugkategorie

	Min	TREMOT	Max
Pkw ¹	12,7	14,6	18,9
LNF ²	12,7	14,6	18,9

Quellen: ¹ Eigene Ermittlung anhand (Nobis und Kuhnimhof 2019), ² Eigene Annahme.

Realverbrauchsfaktoren

Zwar werden die spezifischen Verbräuche pro Fahrzeugkategorie, Antriebstechnologie und Abgasnorm für die in Deutschland gegebenen Verkehrsmengen über das HBEFA integriert, das durchschnittliche Fahrzeug in Deutschland kann aber vom HBEFA-Referenzfahrzeug abweichen. So ist bspw. einem Euro 6d Diesel-Pkw im Handbuch nur ein spezifischer Verbrauch (pro

Verkehrssituation) zugewiesen. Jedoch sind die in Deutschland zugelassenen Pkw im Schnitt größer und weisen einen höheren Verbrauch auf als diese Vergleichsfahrzeuge. Daher wird u. a. anhand der CO₂-Monitoringwerte des KBA eine Korrektur vorgenommen. Weitere Aspekte, die eine Korrektur nötig machen, sind bspw. ein unzureichender Reifendruck, wechselnde Bereifung (Winter-/Sommerreifen), Umgebungsbedingungen (insb. Temperatur) und durchschnittliche Beladung (insb. bei Lkw). Problematisch an diesem Faktor ist, dass die Korrektur nicht vollständig von den Unsicherheiten bzgl. der Schichtemissionsfaktoren, den Verkehrsmengen und auch anderen Aspekten wie dem Fahrverhalten zu trennen sind.

Um die Unsicherheit abzuschätzen, werden bei Pkw und LNF die Monitoring-Werte der EU und Deutschland gegenübergestellt und überprüft, in welchem Maße diese voneinander abweichen. Verwendet werden hierfür die Werte aus (EEA 2018) und (KBA o.J.). Hieraus kann abgeleitet werden, wie genau die Korrektur des Basisverbrauchs (EU) auf den Verbrauch der deutschen Flotte ist. Für Otto-Pkw ergibt sich eine relative Standardabweichung von 0,8 %, für Diesel-Pkw ein Wert von 1,1 % und für LNF ein Wert von 1,8 %. Für Lkw und Busse liegen keine Monitoring-Daten vor, jedoch wird angenommen, dass sich die deutsche Flotte nicht maßgeblich vom europäischen Mittel unterscheidet. Daher wird die geringste ermittelte Abweichung von 0,8 % angenommen.

Zusätzlich wird der Einfluss des Reifendrucks berücksichtigt. Aus (Reifenpresse 2013), (bfp 2018), (Hamburger Abendblatt 2016), (autogazette 2012) und (geoCapture 2022) kann abgeleitet werden, dass der Verbrauch aufgrund des Drucks um bis zu 0,76 % für die gesamte Pkw-Flotte abweichen kann. Für Lkw ergibt sich aus den Analysen ein vergleichbarer Wert, sodass diese vereinfacht auf denselben Wert gesetzt werden. Setzt man diesen Wert als Grenze des 95%-Konfidenzintervalls, erhält man eine relative Standardabweichung von 0,38 %.

Bei Lkw und Bussen wird zudem die Unsicherheit bei der Auslastung berücksichtigt. Diese wird aus den jährlichen Schwankungen abgeschätzt, die als realistische Bandbreite definiert wird. Als Standardabweichung bei Lkw kann eine Beladung von 0,54 t abgeleitet werden. Bei Bussen fällt der Gewichtsunterschied aufgrund der Besetzung kleiner aus und liegt bei lediglich 0,10 t. Bei einem Zusatzverbrauch von 0,34 MJ/km/t (Jöhrens et al. 2021) ergibt sich eine relative Standardabweichung von 1,48 % bei Lkw und 0,21 % bei Bussen. Tabelle 15 zeigt die genannten Unsicherheiten sowie die für den Realverbrauchsfaktor relative Standardabweichung, die sich aus der Fehlerfortpflanzung ergibt.

Tabelle 15: Relative Standardabweichungen - Realverbrauchsfaktoren

	Otto-Pkw	Diesel-Pkw	LNF	Lkw	Bus
Monitoring	0,80%	1,10%	1,80%	0,80%	0,80%
Gewicht*	0%	0%	0%	1,48%	0,21%
Reifendruck	0,38%	0,38%	0,38%	0,38%	0,38%
Realverbrauchsfaktor	0,88%	1,16%	1,84%	1,72%	0,91%

Anmerkungen: *Die Unsicherheit des Gewichtseinflusses bei Pkw und LNF wird als vernachlässigbar erachtet.

2.2.2.2 Desaggregation im HBEFA-Flottenmodell

2.2.2.2.1 Vorgehen

Die granularen Aktivitätsraten müssen für die Verrechnung mit den Basis-Emissionsfaktoren zu Emissionen auf dieselbe Differenzierungsebene gebracht, d.h. zerlegt werden. Die Basis-

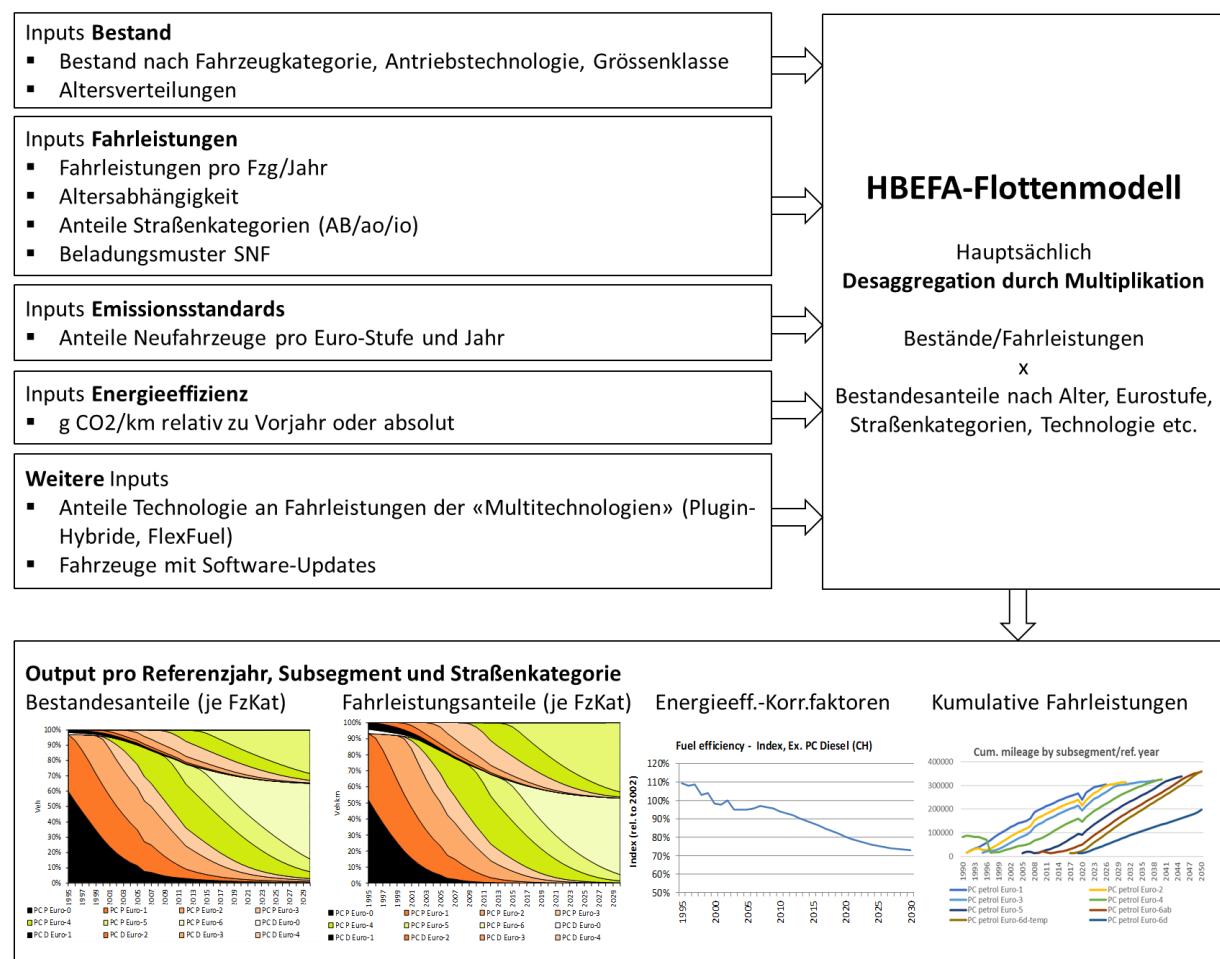
Emissionsfaktoren aus dem PHEM liegen hinsichtlich Fahrzeugtypen differenziert nach HBEFA-Subsegmenten und räumlich/zeitlich differenziert nach HBEFA-Verkehrssituationen und -Längsneigungsklassen vor. Zusätzlich werden Korrekturfaktoren, oder Inputs dafür, benötigt.

Die Anteile der Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen an den Fahrleistungen liegen als externer Input vor (s. vorangehendes Kapitel).

Die Anteile der Subsegmente an den Aktivitäten sowie die Inputs für Korrekturfaktoren, (bzw. Korrekturfaktoren an sich), werden im Flottenmodell der HBEFA-Expert Version hergeleitet. Konkret berechnet das Flottenmodell aus den im vorangehenden Kapitel beschriebenen Inputs (mit Ausnahme der Anteile der Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen an den Fahrleistungen) für jedes Referenzjahr folgende Inputgrößen für die Emissionsberechnung (Abbildung 10):

- ▶ Fahrleistungen pro Subsegment und Straßenkategorie, respektive relative Fahrleistungsanteile der Subsegmente an den Fahrleistungen der jeweiligen Fahrzeugkategorie, nach Straßenkategorie und im Total;
- ▶ Bestände pro Subsegment, respektive relative Anteile der Subsegmente am Bestand der jeweiligen Fahrzeugkategorie;
- ▶ Effizienz-Korrekturfaktoren pro Subsegment zur Berücksichtigung der mit der Zeit (meist) zunehmenden Energieeffizienz der Neuwagen;
- ▶ Kumulative Laufleistungen pro Subsegment, als Input für die Alterungs-Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der nachlassenden Leistung der Katalysatoren mit dem Fahrzeugalter;

Abbildung 10: Inputs und Outputs des HBEFA-Flottenmodells



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS.

Die Unsicherheiten der Inputdaten pflanzen sich über alle Berechnungsschritte des Flottenmodells fort. Da nicht alle Inputparameter normalverteilt sind, ist die Anwendung der Gaußschen Fehlerfortpflanzung nicht zulässig – es müssen Monte Carlo-Simulationen angewendet werden.

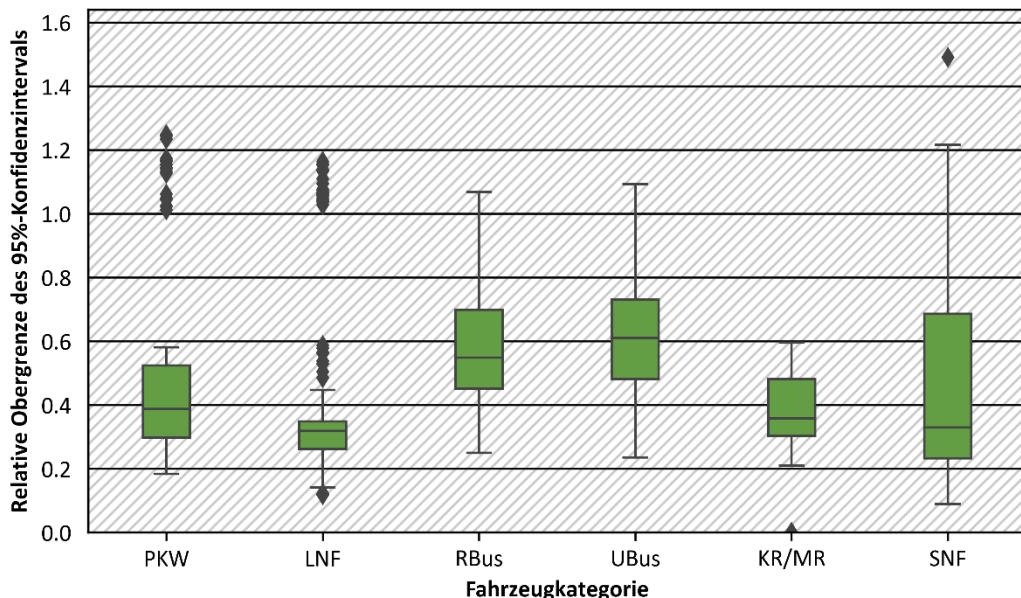
Die bisherige Implementation des HBEFA in Microsoft Access unterstützt eine automatisierte und beliebig oft mit leicht varierten Inputparametern wiederholte Berechnung, wie sie der Monte Carlo-Ansatz erfordert, nicht. Eine solche ließe sich in Access auch nicht mit genügender Performanz umsetzen. Da aber die Migration der gesamten HBEFA-Applikation nach Python kürzlich von den beitragenden Umweltämtern beschlossen wurde, wurde die Migration des Flottenmodells für die vorliegende Studie zeitlich vorgezogen. Somit konnte eine Version des Flottenmodells, welche die notwendigen Monte Carlo-Simulation unterstützt, in Python entwickelt werden. Sie greift insbesondere auf die „numba“-Bibliothek (Anaconda Inc. 2018) zurück, welche oft verwendete, speziell gekennzeichnete und nach gewissen Richtlinien programmierte Teile von Python-Code „just-in-time“ nach C++ kompiliert. Somit können die zahlreichen für die Monte Carlo-Simulation auszuführenden Wiederholungen in hoher Rechengeschwindigkeit ausgeführt werden.

2.2.2.2.2 Resultate

2.2.2.2.2.1 Unsicherheit der Fahrleistungen

Wie erwartet nehmen die Unsicherheiten durch die Desaggregation im HBEFA-Flottenmodell zu. Die Grenzen der Konfidenzintervalle der aus dem Flottenmodell resultierenden Fahrleistungen auf Ebene Subsegment und Straßenkategorie liegen mehrheitlich⁶ zwischen ± 10 und $\pm 70\%$. Abbildung 11 zeigt die Streuung der Obergrenzen der 95%-Konfidenzintervalle der Fahrleistungen nach Fahrzeugkategorie (die Untergrenzen werden wegen der fast vollständigen Symmetrie nicht gezeigt). Der Median der Konfidenzintervallgrenzen liegt für LNF und SNF am niedrigsten und für Linienbusse am höchsten. Im Gegensatz zur geringen Unsicherheit der Fahrzeugkategorie SNF, die über den Median abgebildet wird, weisen SNF den größten Streuungsbereich auf Subsegmentebene auf. Die Unterschiede in den Output-Uncertainties lassen sich auf die Inputs (s. Kapitel 2.2.2.1) zurückführen. So weisen etwa die LNF tendenziell niedrigere Unsicherheiten der Input-Bestandes- und -Fahrleistungsangaben als die Pkw auf, was sich in einer niedrigeren Unsicherheit der resultierenden aggregierten Fahrleistungen niederschlägt. Auf Fahrzeugkategorieebene liegt zwar eine geringe Unsicherheit bei SNF vor, jedoch wird diese überkompensiert durch die hohen Unsicherheiten bezüglich der Aufteilung des SNF-Bestands auf die Subsegmente (aufgrund der Unsicherheit, in welcher Größenklasse bzw. Zugfahrzeug-Anhänger-Kombination die Fahrzeuge fahren). Hohe relative Unsicherheiten ergeben sich tendenziell bei Subsegmenten mit geringen Beständen und Gesamtfahrleistungen, z. B. bei CNG- oder LPG-Fahrzeugen bei den Pkw und LNF oder bei LNG- oder BEV-Lasten- und Sattelzügen. Diese stellen auch die Ausreißer in Abbildung 11 dar.

Abbildung 11: Streuung der Unsicherheiten der Fahrleistungen nach Fahrzeugkategorie



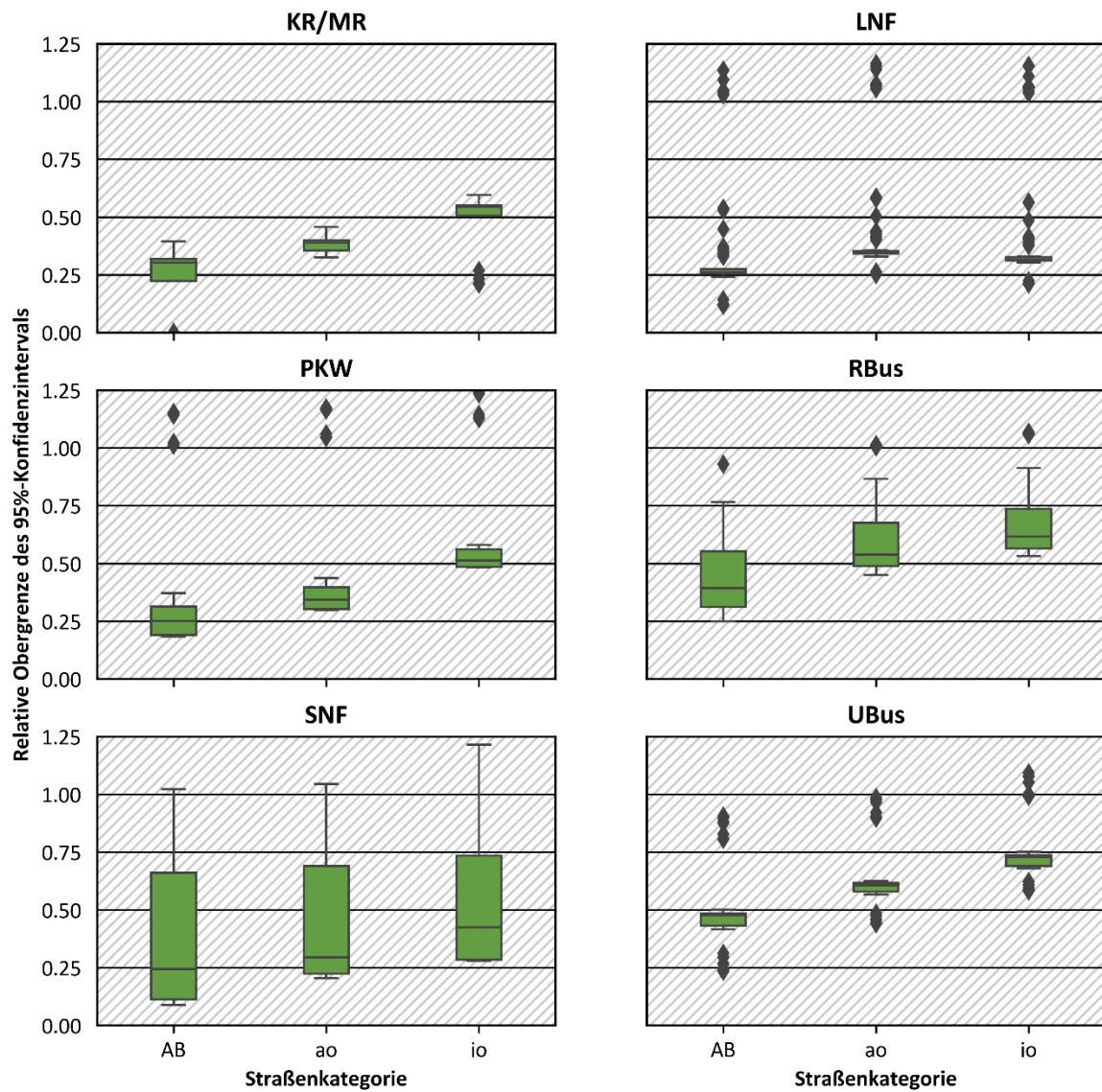
Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkung: Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeugkategorie dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro

⁶ Die Formulierung «mehrheitlich» in diesem Kontext bedeutet, dass die genannte Bandbreite die 25%- und 75%-Perzentile einschließt. Das heißt, es liegen mehr als die Hälfte der 95%-Konfidenz-Intervallgrenzen innerhalb dieser Bandbreite.

Fahrzeugkategorie. Aufgrund der Symmetrie der Verteilungen sind Ober- und Untergrenzen bis auf das Vorzeichen (nahezu) identisch, daher werden hier nur die Obergrenzen der 95%-Konfidenzintervalle gezeigt.

Betrachtet man die Streuung der Konfidenzintervallgrenzen differenziert nach Straßenkategorie, so fällt auf, dass die relative Unsicherheit der Fahrleistungen auf der Autobahn am niedrigsten und innerorts am höchsten ist (Abbildung 12). Dies liegt einerseits daran, dass bereits die Input-Unsafeheiten für den Autobahnanteil der Fahrleistungen niedriger sind als für die beiden anderen Straßenkategorien – was aufgrund der höheren Zählstellendichte bei weniger Zu- und Ausfahrtmöglichkeiten zu erwarten ist. Andererseits zeigt die Betrachtung der Streuung der einzelnen Zufallswerte aus der Monte-Carlo-Simulation (siehe Abbildung 13 für die Pkw Otto Euro-4, das Subsegment mit den höchsten Fahrleistungen in der deutschen Flotte des Jahres 2019), dass der absolute Streubereich der Zufallswerte der inner- und außerorts-Fahrleistungen ähnlich breit ist – die relative auf den Mittelwert bezogene Unsicherheit ist aber aufgrund der niedrigeren absoluten innerorts-Fahrleistungen höher.

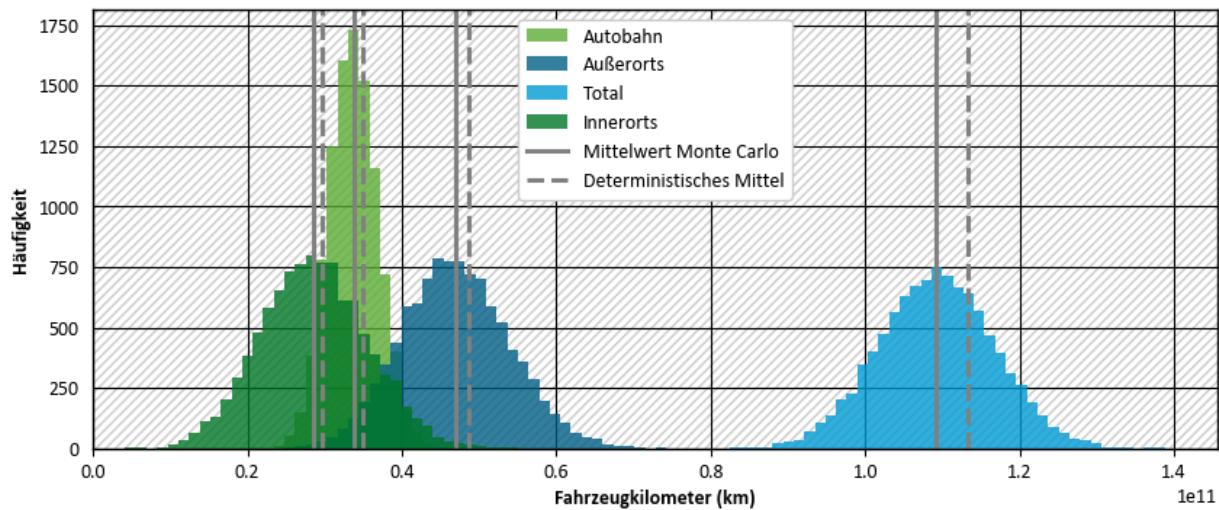
Abbildung 12: Streuung der Unsicherheiten der Fahrleistungen nach Fahrzeug – und Straßenkategorie



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkung: Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeugkategorie und Straßenkategorie dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Fahrzeug- und Straßenkategorie. Aufgrund der Symmetrie der Verteilungen sind Ober- und Untergrenzen bis auf das Vorzeichen identisch, daher werden hier nur die Obergrenzen der 95%-Konfidenzintervalle gezeigt.

Schließlich lässt sich durch die visuelle Überprüfung der Verteilungen feststellen, dass sich die teilweise schiefen oder dreieckförmigen Input-Verteilungen durch die Berechnungen im HBEFA-Flottenmodell zu einem großen Teil „normalisieren“ und symmetrischer werden. Abbildung 13 zeigt ein exemplarisches Beispiel der resultierenden Verteilungen für den Fall der Pkw Otto Euro-4. Diese Verteilungen ergeben sich aus den Input-Unsicherheitsparametern in Tabelle 16.

Abbildung 13: Verteilung der Zufallswerte der Fahrleistungen aus den Monte-Carlo-Simulationen mit dem HBEFA-Flossenmodell: Beispiel der Pkw Otto Euro-4



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkung: Das „deterministische Mittel“ ist der Einzelwert, der ohne Monte-Carlo-Simulation und Berücksichtigung der Unsicherheit resultiert.

Tabelle 16: Input- und Output-Unsafeheiten HBEFA-Flossenmodell am Beispiel der Pkw Otto Euro 4

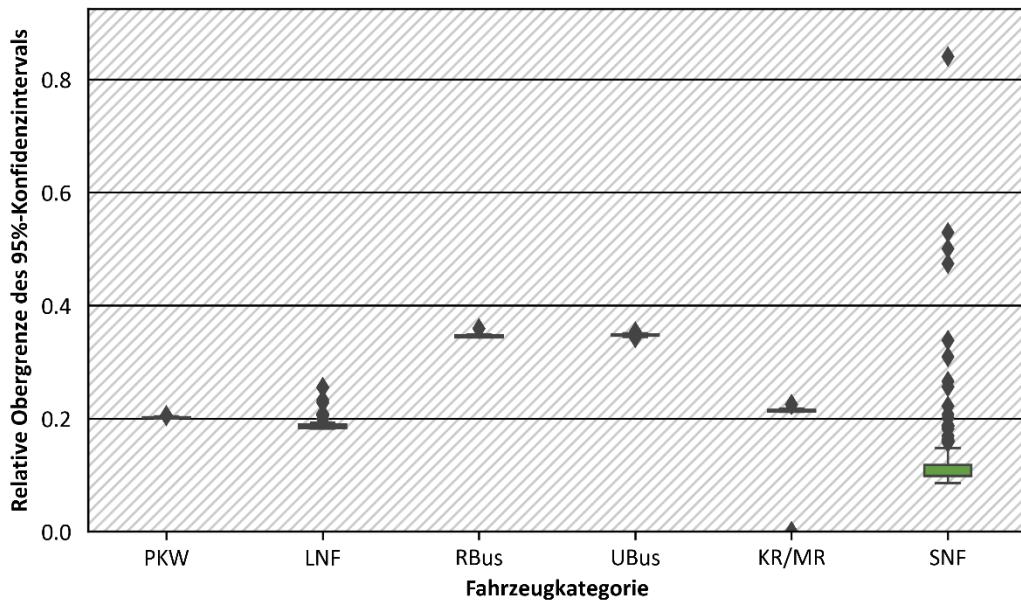
Inputparameter	U (UG)	U (OB)	Art der Verteilung
Bestand Ebene Fahrzeugkategorie	-0,2%	0,2%	normal
Bestand Ebene Segment	-1,2%	0,4%	Dreieck
Bestandsanteil Altersklassen	-1,5%	1,5%	Dreieck
Individuelle Fahrleistungen [km/Fzg * Jahr]	-20,2%	20,2%	normal
Anteile Straßenkategorien an Fahrleistungen:			
- Autobahn	-12,4%	12,4%	normal
- außerorts	-26,5%	26,5%	normal
- innerorts	-23,6%	23,6%	normal
Anteil Emissionskonzept	-13,1%	2,2%	Dreieck
Output-Unsafeheit Fahrleistung Pkw Otto Euro 4 je Straßenkategorie:			
- Autobahn	-18,8%	18,8%	normal
- außerorts	-29,9%	29,9%	normal
- innerorts	-47,8%	47,8%	normal

2.2.2.2.2 Unsicherheit der Laufleistungen

Die relativen Unsicherheiten der Laufleistungen (welche die Inputwerte für die Alterungs-Korrekturfaktoren der Emissionen darstellen) liegen niedriger als diejenigen der jährlichen Fahrleistungen, da sie sich aus der Summierung letzterer über die bisherige Lebensdauer der Fahrzeuge ergeben und somit höhere absolute Mittelwerte aufweisen, welche sich bei ähnlichen Standardabweichungen in niedrigeren relativen Unsicherheiten niederschlagen. Die Streubereiche der Konfidenzintervallgrenzen der Laufleistung nach Fahrzeugkategorie

(Abbildung 14) verhalten sich ähnlich zueinander wie diejenigen der Fahrleistungen (Abbildung 11).

Abbildung 14: Streuung der Unsicherheiten der Laufleistungen nach Fahrzeugkategorie



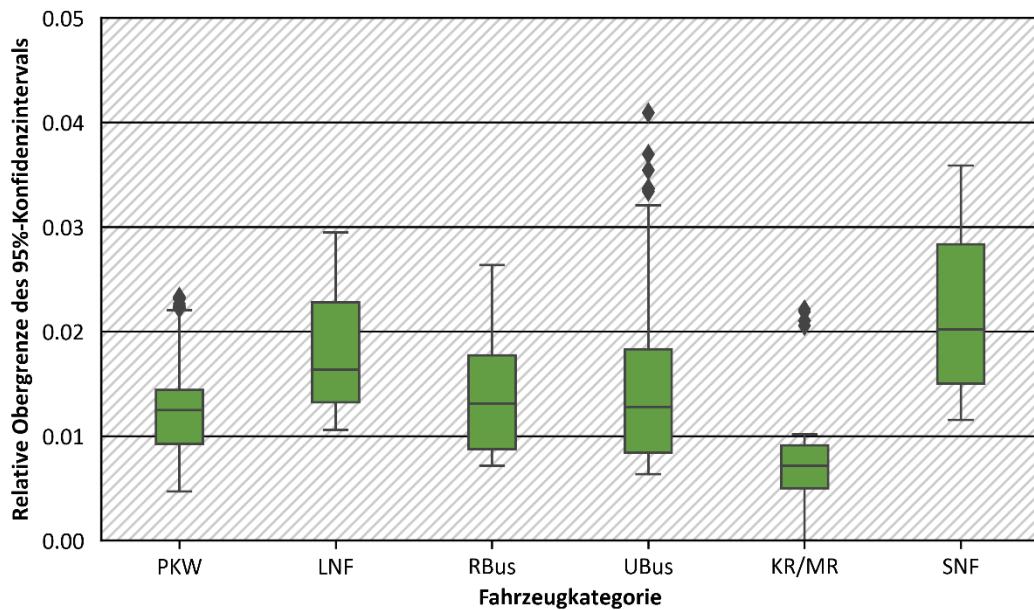
Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkung: Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeugkategorie dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Fahrzeugkategorie. Aufgrund der Symmetrie der Verteilungen sind Ober- und Untergrenzen bis auf das Vorzeichen identisch, daher werden hier nur die Obergrenzen der 95%-Konfidenzintervalle gezeigt.

2.2.2.2.2.3 Unsicherheit der Energieeffizienz-Korrekturfaktoren

Die relativen Unsicherheiten der Energieeffizienz-Korrekturfaktoren, welche den Kraftstoffverbrauch korrigieren, sind niedrig – die Variationskoeffizienten bewegen sich in einem Bereich von ± 0.5 bis $\pm 2\%$ resp. relativen Grenzen der 95%-Konfidenzintervalle in einem Bereich von ± 1 bis $\pm 4\%$ (siehe Abbildung 15).

Zu beachten ist, dass bei den SNF zwei Ausreißer (die Subsegmente SZ/LZ LNG Euro-VI (CI) und SZ/LZ BEV) mit 95%-Konfidenzintervall-Obergrenzen von 42 % resp. 76 % oberhalb des in Abbildung 15 gezeigten Ausschnittes liegen. Die Unsicherheit liegt hier so viel höher, weil die relative Unsicherheit der einfließenden Fahrleistungen bei diesen beiden Subsegmenten aufgrund deren niedrigen Bestandes ebenfalls hoch ist.

Abbildung 15: Streuung der Unsicherheit der Effizienz-Korrekturfaktoren nach Fahrzeugkategorie



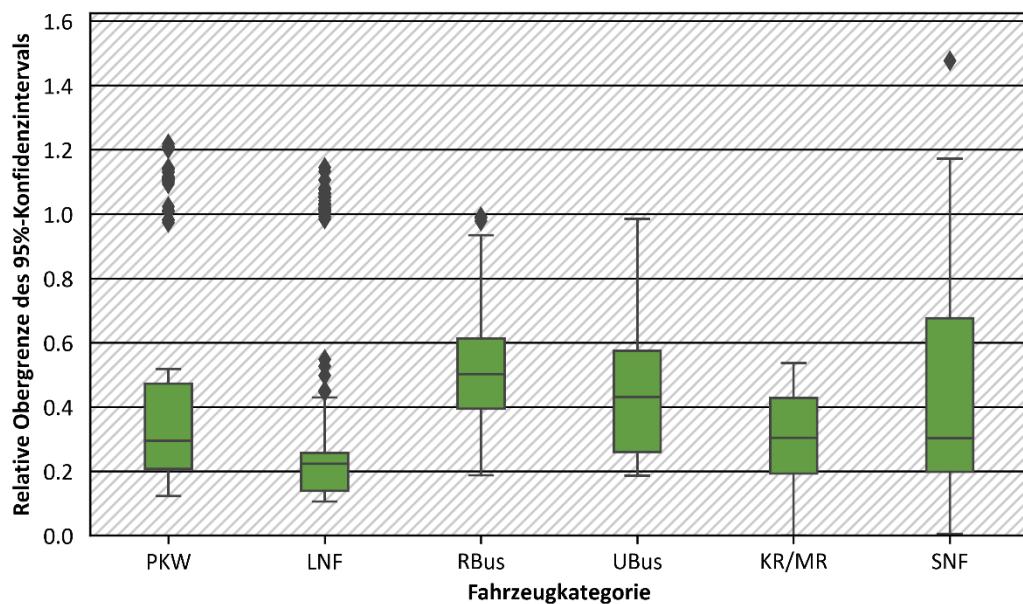
Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkungen: a) Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeugkategorie dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Fahrzeugkategorie. Aufgrund der Symmetrie der Verteilungen sind Ober- und Untergrenzen bis auf das Vorzeichen identisch, daher werden hier nur die Obergrenzen der 95%-Konfidenzintervalle gezeigt. b) Zwei Ausreißer (die Subsegmente TT/AT LNG Euro-VI (CI) und TT/AT BEV) liegen oberhalb des gezeigten Ausschnittes.

2.2.2.2.2.4 Unsicherheit der Bestände

Die Unsicherheiten (relative Grenzen der 95%-Konfidenzintervalle) der mittels dem HBEFA-Flottenmodell desaggregierten Bestände liegen bei den leichten Motorfahrzeugen (Pkw, LNF) und den Krafträder zwischen 15 und 50 % (Abbildung 16). Bei den schweren Motorfahrzeugen streuen die Unsicherheiten in höhere Bereiche; die höchsten Bestandes-unsicherheiten auf Subsegment-Ebene weisen die SNF auf. Diese geht v. a. auf die Unsicherheit darüber zurück, in welcher Größenklasse bzw. Zugfahrzeug-Anhänger-Kombination die Fahrzeuge herumfahren.

Die Bestände fließen in die nachfolgenden Berechnungen nur bei den Verdampfungs-Emissionen der Kohlenwasserstoffe ein. Bei den Kaltstartemissionen spielen sie keine Rolle, da die Anzahl Starts hier mittels Division der Fahrleistungen durch die durchschnittliche Fahrtlänge ermittelt wird.

Abbildung 16: Streuung der Unsicherheiten des Bestandes nach Fahrzeugkategorie



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkung: Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeugkategorie dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Fahrzeugkategorie. Aufgrund der Symmetrie der Verteilungen sind Ober- und Untergrenzen bis auf das Vorzeichen identisch, daher werden hier nur die Obergrenzen der 95%-Konfidenzintervalle gezeigt.

2.3 Schichtemissionsfaktoren

2.3.1 Schichtemissionsfaktoren regulierter Schadstoffe

Die Ermittlung der Unsicherheiten der Schichtemissionsfaktoren wurde von uns für Personenkraftwagen (Pkw) sowie für leichte und schwere Nutzfahrzeuge (LNF, SNF), durchgeführt.

In einem ersten Schritt sind die relevanten Einzelunsicherheiten zu identifizieren. Diese sind:

- ▶ Unsicherheit aus einer limitierten Stichprobe: beschreibt das Vertrauensintervall, mit dem das mittlere Emissionsniveau der gemessenen Kfz mit dem der gesamten Flotte übereinstimmt. Dieses wird aus Messwerten und Anzahl der gemessenen Kfz berechnet und enthält daher:
 - Messunsicherheiten
 - Wiederholbarkeit von Messungen am selben Kfz (z. B. Abhängigkeit von der Vorbeladung eines NO_x-Speicherkatalysators)
 - Unterschiede im Emissionsniveau von Kfz gleicher Marke und Type (Serienstreuung)
 - den limitierten Stichprobenumfang

- Unsicherheit aus dem Simulationsmodell: beschreibt das Vertrauensintervall, mit dem das reale Emissionsniveau der gemessenen Kfz mit dem simulierten übereinstimmt⁷. Dabei wird die Unsicherheit für das für HBEFA verwendete Simulationsmodell PHEM, z. B. (Weller 2020) zusammen mit den bei HBEFA verwendeten Methoden der Modellerstellung bestimmt.
- Unsicherheit aus den Zyklen zu den HBEFA Verkehrssituationen (TS): beschreibt das Vertrauensintervall, mit dem der HBEFA Fahrzyklus einer Verkehrssituation diese in der Realität repräsentativ beschreibt
- Unsicherheit aus dem Beladungseinfluss: beschreibt die Unsicherheit, die aus der (unbekannten realen) Beladung der Pkw gegenüber der in der Simulation verwendeten Beladung entsteht, inklusive Fahranteile mit Dachträger und Anhänger.
- Unsicherheit aus der Steigung: beschreibt die Unsicherheit, die aus der je Zyklus konstant angenommenen Steigung der HBEFA-Zyklen gegenüber den Emissionen bei variablen, realen Steigungen, entsteht.

Die jeweiligen Unsicherheiten wurden in weiterer Folge mit den verfügbaren Mess- und Simulationsdaten bestimmt. Die gesamte vorliegende Unsicherheit berechneten wir mittels Fehlerfortpflanzung für NO_x, CO, HC und PM. Die Ergebnisse schlüsselten wir nach Emissionsklassen (Pre EURO 1 - EURO 6d) und – sofern signifikant - auch nach Verkehrssituation (Stadt, Überland und Autobahn) auf.

In Kapitel 2.3.1.1 zeigt die Datengrundlage, Kapitel 2.3.1.2 die relevanten Unsicherheiten je Fahrzeugkategorie, Kapitel 2.3.1.3 die verwendeten mathematischen Grundlagen und Kapitel 2.3.1.4 zeigt das Vorgehen bei der Bestimmung der Einzelunsicherheiten. Kapitel 2.3.1.5 fasst die gesamten Unsicherheiten für Pkw sowie LNF, Kapitel 2.3.1.6 die für SNF zusammen.

In Kapitel 2.3.1.7 werden sowohl die bewältigten Herausforderungen, als auch notwendige Maßnahmen zur Verbesserung zukünftiger Unsicherheitsanalysen der Schichtemissionsfaktoren, zusammengefasst.

2.3.1.1 Datengrundlage

Für die Ermittlung der Einzelunsicherheiten stand je Fahrzeug- und Emissionsklasse eine unterschiedliche Anzahl an Fahrzeugen zur Verfügung.

2.3.1.1.1 Pkw & LNF

Für die Pkw-Daten der Emissionsklassen Pre EURO 1 bis EURO 4 haben wir auf Literaturwerte zurückgegriffen, da die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren des HBEFA für diese Kategorien schon in (Zallinger 2010) berechnet wurden.

In Tabelle 17 und Tabelle 18 ist die Anzahl der verfügbaren Otto- und Diesel-Pkw für alle Emissionsklassen dargestellt. Je nach Unsicherheit und Emissionskomponente wurden in einzelnen Fällen auch weniger Fahrzeuge für die Auswertung herangezogen. Dies lag unter anderem daran, dass die Messdaten für die Bestimmung der Wiederholbarkeit (Kapitel 2.3.1.4.1.2) und der Serienstreuung (Kapitel 2.3.1.4.1.3) gewisse Anforderungen, wie z. B. Verfügbarkeit mehrerer Messungen des selben Fahrzeuges im selben Fahrzyklus, erfüllen mussten. Des Weiteren waren nicht für alle Tests alle Emissionskomponenten verfügbar.

⁷Aus dem Vergleich der Messdaten mit Simulationsergebnissen ergibt sich die gesamte Unsicherheit aus Messunsicherheit, Wiederholbarkeit und Simulationsmodell. Für die Modellunsicherheit haben wir die Unsicherheiten aus Messunsicherheit und Wiederholbarkeit abgezogen, da diese schon in der Unsicherheit der Stichprobe enthalten sind.

Beispielsweise werden HC-Emissionen bei Pkw und LNF nur am Rollenprüfstand aber nicht bei On-Board Tests erfasst.

Tabelle 17: Datengrundlage Otto-Pkw

Emissionsklasse	Anzahl Fahrzeuge in Analyse [#]
Pre EURO 1	7*
EURO 1	8*
EURO 2	29*
EURO 3	84*
EURO 4	163*(19**)
EURO 5	18
EURO 6abc	43
EURO 6d-TEMP	10
EURO 6d	3

Anmerkungen: *Daten aus (Zallinger 2010): für die Ermittlung der Stichprobenunsicherheit herangezogen; **Daten aus (Zallinger 2010): für die Ermittlung der Modellunsicherheit herangezogen (EURO 4 als repräsentativ für Pre EURO 1 bis EURO 5 angenommen).

Tabelle 18: Datengrundlage Diesel-Pkw

Emissionsklasse	Anzahl Fahrzeuge in Analyse [#]
Pre EURO 1	2*
EURO 1	4*
EURO 2	28*
EURO 3	54*
EURO 4	80*(7**)
EURO 5	27
EURO 6abc	93
EURO 6d-TEMP	12
EURO 6d	2

Anmerkungen: *Daten aus (Zallinger 2010): für die Ermittlung der Stichprobenunsicherheit herangezogen; **Daten aus (Zallinger 2010) für die Ermittlung der Modellunsicherheit herangezogen (EURO 4 als repräsentativ für Pre EURO 1 bis EURO 5 angenommen).

Für LNF waren nicht ausreichend unabhängige Daten zur Bestimmung der Unsicherheiten verfügbar. Daher wurden die Unsicherheiten von Pkw übernommen und, wo Daten für LNF verfügbar waren, angepasst.

2.3.1.1.2 SNF

Für die Daten der Emissionsklassen Pre EURO I bis EURO V haben wir wiederum auf Literaturwerte (Rexeis 2009) zurückgegriffen, da dort bereits eine Unsicherheitsanalyse der

HBEFA Emissionsfaktoren für SNF durchgeführt wurde. In Tabelle 19 ist die Gesamtanzahl an verfügbaren Fahrzeugen für EURO VI A-C und EURO VI D dargestellt. Wie auch bei den Pkw konnten, je nach Unsicherheit und Emissionskomponente, nicht alle Fahrzeuge für die Auswertung berücksichtigt werden (Kapitel 2.3.1.1.1). Für die Abgasklassen EURO VI A-C wurden neun Fahrzeuge auf dem Rollenprüfstand der TUG vermessen. Wir verwendeten die dabei ermittelten Daten für die Kennfelderstellung der Komponenten CO, HC und PM. Für die Erstellung und Kalibrierung des Abgasnachbehandlungssystems für NO_x waren Messdaten von 29 Fahrzeugen verfügbar. Diese Daten enthalten sowohl Rollenmessungen als auch RDE-Messungen, welche teilweise von Partnerinstituten stammten.

Tabelle 19: Datengrundlage SNF

Emissionsklasse	Anzahl Fahrzeuge in Analyse [#]
EURO III – EURO V	Daten aus (Rexeis 2009)
EURO VI A-C	9 (29)*
EURO VI D	11

Anmerkung: *Abgasnachbehandlungsmodell von NO_x.

2.3.1.2 Übersicht Einzelunsicherheiten je Fahrzeugkategorie

Die von uns identifizierten Einzelunsicherheiten für die Basis-Emissionsfaktoren (Basis-EFs) werden in Tabelle 20 aufgeschlüsselt. Für die jeweilige Fahrzeugkategorie (Pkw, SNF, Bus) relevanten Unsicherheiten sind mit einem X gekennzeichnet. Im Gegensatz zu Pkw, wo in HBEFA eine fixe Beladung vorgegeben ist, sind für SNF EF mitunterschiedlichen Beladungen (unbeladen, halb und voll beladen) hinterlegt. Durch Interpolation können somit alle Beladungssituationen bei SNF abgedeckt werden, daher muss auch keine Beladungsunsicherheit ermittelt werden.

Tabelle 20: Relevante Einzelunsicherheiten der Basis Emissionsfaktoren (Basis-EF)

Unsicherheit	Verteilung	Pkw	SNF, Bus
Stichprobe	log-normal	X	X
Modell	normal	X	X
HBEFA Verkehrssituationen (TS)	normal	X	X
Beladungseinfluss	normal	X	-
Steigung	normal	X	X

Die in Tabelle 21 beschriebenen Unsicherheiten sind teilweise bereits implizit in der Stichprobenunsicherheit und der Modellunsicherheit enthalten. Um eine doppelte Berücksichtigung zu verhindern, wird diesem Umstand bei der Ermittlung der Modellunsicherheit Rechnung getragen (siehe Kapitel 2.3.1.4.2.2).

Tabelle 21: Implizit enthaltene Unsicherheiten

Unsicherheit	Verteilung	Pkw	SNF
Messunsicherheit (ME)	normal	X	X
Wiederholbarkeit (WH)	normal	X	X
Serienstreuung (Sst)	normal	X	X

Die in Tabelle 22 dargestellten Unsicherheiten der Korrekturfaktoren und Kaltstartzusatzemissionen werden im HBEFA nur für bestimmte Fahrzeugkategorien und Emissionen angewandt. Ein Temperaturkorrekturfaktor kommt z. B. nur bei NO_x-Emissionen von Diesel-Pkw und Diesel-LNF zum Einsatz. Bei SNF wurden bisher solche Abhängigkeiten noch nicht gefunden. Alterungskorrekturfaktoren kommen bei allen drei Fahrzeugkategorien zum Einsatz. Kaltstartzusatzemissionen sind in HBEFA bisher nur für Pkw und LNF hinterlegt. Damit können keine Unsicherheiten für Kaltstartemissionen von SNF erzeugt werden, obwohl die Unsicherheit der Gesamtemissionen ohne Berücksichtigung der Kaltstartemissionen natürlich zu nimmt.

Tabelle 22: Unsicherheiten der Korrekturfaktoren und der Kaltstartzusatzemissionen

Unsicherheit	Verteilung	Pkw	SNF
Temperaturkorrekturfaktor	normal	X*	-
Alterungskorrekturfaktor	normal	X	X
Kaltstartzusatzemissionen	log-normal	X	-

Anmerkung: *Temperaturkorrekturfaktor nur bei NO_x-Emissionen von Diesel-Pkw und -LNF in Verwendung.

2.3.1.3 Mathematische Grundlagen

Dieses Kapitel widmet sich den mathematischen Grundlagen, die wir für die Berechnung der Unsicherheiten mit Normalverteilung und die Log-Normalverteilung heranzogen. Nachfolgend werden die angewendeten Gleichungen beschrieben. Die Berechnung des Mittelwertes nach Formel 4 und des gewichteten Mittelwertes nach Formel 5 findet bei beiden Verteilungsarten seine Anwendung. Formel 5 wird jeweils dort verwendet, wo die Daten eine Gewichtung nach Marken und Typen entsprechend deren Flottenanteile zulassen.

Formel 4: Mittelwert (Hedderich und Sachs 2016)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Formel 5: Gewichteter Mittelwert (Sibbertsen und Lehne 2021)

$$\bar{x}_{gew} = \frac{\sum_{i=1}^n (k_i \cdot x_i)}{\sum_{i=1}^n (k_i)}$$

mit

n - Stichprobenanzahl [#]

k_i - Gewichtungsfaktoren (z. B.: Zulassungszahlen) [#]

x_i - Messwert [gSchadstoff/kgKraftstoff]

\bar{x} - Mittelwert über n Messwerte [gSchadstoff/kgKraftstoff]

\bar{x}_{gew} - Gewichteter Mittelwert über n Messwerte [gSchadstoff/kgKraftstoff]

2.3.1.3.1 Formeln bei Normalverteilung

Im Zuge unserer Auswertung unterstellten wir in den meisten Fällen eine Normalverteilung. Die zu ermittelnden Größen waren hier einerseits die Standardabweichung und andererseits die Standardabweichung des Mittelwertes, in gewichteter oder ungewichteter Form.

Formel 6 zeigt, wie die Standardabweichung einer Stichprobe berechnet wird.

Formel 6: Standardabweichung einer Stichprobe bei Normalverteilung (Hedderich und Sachs 2016)

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

mit

s - Standardabweichung [gSchadstoff/kgKraftstoff]

n - Stichprobenanzahl [#]

x_i - Messwert [gSchadstoff/kgKraftstoff]

\bar{x} - Mittelwert über n Messwerte [gSchadstoff/kgKraftstoff]

Ist eine, beispielsweise nach Zulassungszahlen, gewichtete Standardabweichung erforderlich, kann Formel 7 herangezogen werden.

Formel 7: Gewichtete Standardabweichung bei Normalverteilung (Sibbertsen und Lehne 2021)

$$s_{gew} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n (k_i)} \sum_{i=1}^n k_i * (x_i - \bar{x}_{gew})^2}$$

mit

s_{gew} - Gewichtete Standardabweichung [gSchadstoff/kgKraftstoff]

n - Stichprobenanzahl [#]

k_i - Gewichtungsfaktoren (z. B. nach Zulassungszahlen) [#]

\bar{x} - Mittelwert über n Messwerte [gSchadstoff/kgKraftstoff]

In Formel 8 ist jene Gleichung veranschaulicht, mit welcher wir die Standardabweichungen zwischen Messungen und Simulationen, aber auch zwischen Simulationen und Simulationen, unter Variation der Parameter (Steigung, Beladung, usw.), ermittelten.

Formel 8: Standardabweichung zwischen unterschiedlichen Werten (Schrodt 2019)

$$s_M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i1} - x_{i2})^2}$$

mit

- s_M - Standardabweichung [gSchadstoff/kgKraftstoff]
 n - Anzahl an Simulationen [#]
 x_{i1} - Messwert oder Simulationswert mit Setting 1 [gSchadstoff/kgKraftstoff]
 x_{i2} - Simulationswert mit Setting 2 [gSchadstoff/kgKraftstoff]

Um aus einer Standardabweichung den 95%-Konfidenzintervall zu bestimmen, ist die Standardabweichung zu verdoppeln. Damit wird das Intervall um den Mittelwert berechnet, in dem eine weitere Probe mit 95 % Wahrscheinlichkeit liegen werden.

Formel 9: Unsicherheit aus Standardabweichung bei Normalverteilung (Hedderich und Sachs 2016)

$$U_{x95\%} = 2 * s$$

mit

- $U_{x95\%}$ - Unsicherheit / 95%-Konfidenzintervall [gSchadstoff/kgKraftstoff]
 s - Standardabweichung [gSchadstoff/kgKraftstoff]

Hier ist insbesondere die Standardabweichung des Mittelwertes und, in weiterer Folge, die Unsicherheit des Mittelwertes wesentlich. Weitere berechneten wir mithilfe der Student-t-Verteilung und Formel 10. Der Parameter t kann dabei einer Tabelle entnommen werden und ist von der Stichprobengröße abhängig. Dieser nähert sich bei großer Stichprobenanzahl bei einem geforderten Konfidenzintervall von 95 % dem Wert 2 an.

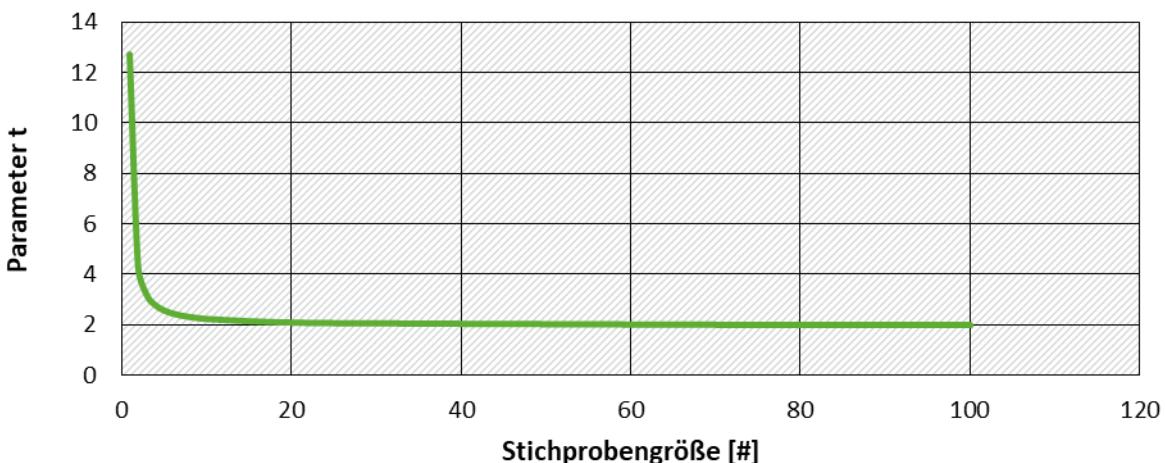
Formel 10: Unsicherheit des Mittelwertes bei Normalverteilung (Hedderich und Sachs 2016)

$$U_{s_{\bar{x}}95\%} = t * \frac{s}{\sqrt{n}}$$

mit

- $U_{s_{\bar{x}}95\%}$ - Unsicherheit / 95%-Konfidenzintervall [gSchadstoff/kgKraftstoff]
 s - Standardabweichung [gSchadstoff/kgKraftstoff]
 n - Stichprobenanzahl [#]
 t - Parameter der Student-t-Verteilung [#], siehe Abbildung 17.

Abbildung 17: Abhängigkeit des Parameters t der Student-t-Verteilung von der Stichprobengröße



Quelle: Eigene Darstellung, FVT.

Für die relative Unsicherheit ist die Unsicherheit auf den Mittelwert zu beziehen, wie in Formel 11 dargestellt.

Formel 11: Relative Unsicherheit (Hedderich und Sachs 2016)

$$U_{xrel95\%} = \frac{U_{x95\%}}{\bar{x}} * 100$$

mit

$U_{x95\%}$ - Unsicherheit / 95%-Konfidenzintervall [gSchadstoff/kgKraftstoff]

$U_{xrel95\%}$ - Relative Unsicherheit / Relatives 95%-Konfidenzintervall [%]

\bar{x} - Mittelwert [gSchadstoff/kgKraftstoff]

2.3.1.3.2 Formeln bei Log-Normalverteilung

Einige Verteilungen zeigen gegenüber dem Mittelwert in Richtung Null geringere Abweichungen als in Richtung hoher Werte. Zum Beispiel gibt es einzelne Kfz mit sehr hohen, aber keine mit negativen Emissionen. Diese Verteilungen haben wir jeweils als Log-Normalverteilung angenähert.

Im Falle der Log-Normalverteilung sind für unsere Auswertung zwei weitere Gleichungen zur Bestimmung der relativen Unsicherheit des Mittelwertes von Bedeutung. Da diese Verteilung eine Schiefverteilung ist, wird die untere relative Grenze des 95%-Konfidenzintervalls mit Formel 12 und die obere relative Grenze des 95%-Konfidenzintervalls mit Formel 13 bestimmt. Für die Erarbeitung dieser Formeln wurden die Literaturquellen (Olsson 2005) und (Hedderich und Sachs 2016) herangezogen.

Der enthaltene Term $\sqrt{K-k}/\sqrt{K-1}$ spiegelt einen Endlichkeitsfaktor wider. Dieser soll berücksichtigen, dass die Unsicherheit des Mittelwertes einer Stichprobeanzahl, die gleich der Grundgesamtheit (hier alle Marken und Typen) ist, Null wird.

Die in den Gleichungen enthaltene Standardabweichung s kann für den ungewichteten Fall mit Formel 6 und für den gewichteten Fall mittels Formel 7 berechnet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Messwerte vor dem Einsetzen in Formel 4, Formel 5, Formel 6 und Formel 4 zu logarithmieren sind.

Formel 12: Relative untere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls des Mittelwertes bei Log-Normalverteilung

$$U_{u95\%} = \left(1 - e^{-2 * \sqrt{\frac{s^2}{n}}} \right) * \sqrt{\frac{K-k}{K-1}} * 100$$

Formel 13: Relative obere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls des Mittelwertes bei Log-Normalverteilung

$$U_{o95\%} = \left(e^{2 * \sqrt{\frac{s^2}{n}}} - 1 \right) * \sqrt{\frac{K-k}{K-1}} * 100$$

mit

$U_{u95\%}$ - Relative untere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls des Mittelwertes [%]

$U_{o95\%}$ - Relative obere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls des Mittelwertes [%]

s - Standardabweichung [gSchadstoff/kgKraftstoff]

- n - Stichprobenanzahl [#]
 k - Anzahl der Fahrzeugmodelle die mit der Fahrzeugstichprobe abgedeckt sind [#]
 K - Gesamtanzahl der zugelassenen Fahrzeugmodelle im Betrachtungszeitraum für die betrachtete Emissionsklasse [#]

Um später die gesamte Unsicherheit aus den Einzelkomponenten mit normal- und log-normalverteilten Ereignissen zu bestimmen, haben wir für die log-normalverteilten Ereignisse die Standardabweichung aus der Differenz der Unsicherheiten berechnet (Formel 14).

Formel 14: Standardabweichung für Log-Normalverteilung

$$s_{ln} = (U_{095\%} - U_{u95\%})/4$$

mit

- s_{ln} - Standardabweichungsäquivalent der log-normalverteilten Ereignisse

2.3.1.3.3 Fehlerfortpflanzung/Gesamtunsicherheit

Mittels Fehlerfortpflanzung (Formel 3 aus Abschnitt 1.2.2.3) wurde die Standardabweichung s der gesamten Kette der Emissionsfaktoren bestimmt. Damit kann danach die Breite des 95%-Konfidenzintervalls berechnet werden.

Aus einer Kombination von log-normalverteilten und normalverteilten Bestandteilen der gesamten Unsicherheiten erwarten wir eine Log-Normalverteilung der gesamten Unsicherheit. Als Basis zur Bestimmung der unteren und oberen Grenzen der Unsicherheiten der gesamten Emissionsfaktoren wurden daher mit Formel 15 und Formel 16 die Parameter der Log-Normalverteilung für die Kombination aller Unsicherheiten berechnet.

Formel 15: Parameter (σ) der Log-Gesamt-Normalverteilung

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\ln\left(\frac{\bar{var}}{\bar{x}^2} + 1\right)}$$

mit

- σ - Formparameter der Log-Normalverteilung [-]
 var - Varianz der mittels Fehlerfortpflanzung bestimmten Log-Gesamt-Normalverteilung [(gSchadstoff/kgKraftstoff)²]
 \bar{x} - Mittelwert der Emissionsschicht (entspricht EF) [gSchadstoff/kgKraftstoff]

Formel 16: Parameter (μ) der Log-Gesamt-Normalverteilung

$$\mu = \ln\left(\frac{\bar{x}^2}{\sqrt{\bar{var} + \bar{x}^2}}\right)$$

mit

- μ - Skalen-Parameter der Log-Normalverteilung [-]
 var - Varianz der mittels Fehlerfortpflanzung bestimmten Log-Gesamt-Normalverteilung [(gSchadstoff/kgKraftstoff)²]
 \bar{x} - Mittelwert der Emissionsschicht (entspricht EF) [gSchadstoff/kgKraftstoff]

Unter Anwendung von Formel 17 und Formel 18 konnten letztlich die relativen Grenzen des 95%-Konfidenzintervalls für die Basis-EF berechnet werden.

Formel 17: Untere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls der Log-Gesamt-Normalverteilung (Limpert et al. 2001)

$$U_{u95\%ges} = \frac{e^{\mu}}{e^{\sigma^2}}$$

mit

$U_{u95\%ges}$ - Untere Grenze des 95%-Konfidenzintervall [gSchadstoff/kgKraftstoff]

μ - Skalen-Parameter der Log-Normalverteilung [-]

σ - Formparameter der Log-Normalverteilung [-]

Formel 18: Obere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls der Log-Gesamt-Normalverteilung (Limpert et al. 2001)

$$U_{o95\%ges} = e^{\mu} * e^{\sigma^2}$$

mit

$U_{o95\%ges}$ - Obere Grenze des 95%-Konfidenzintervall [gSchadstoff/kgKraftstoff]

μ - Skalen-Parameter der Log-Normalverteilung [-]

σ - Formparameter der Log-Normalverteilung [-]

2.3.1.4 Bestimmung der Einzelunsicherheiten

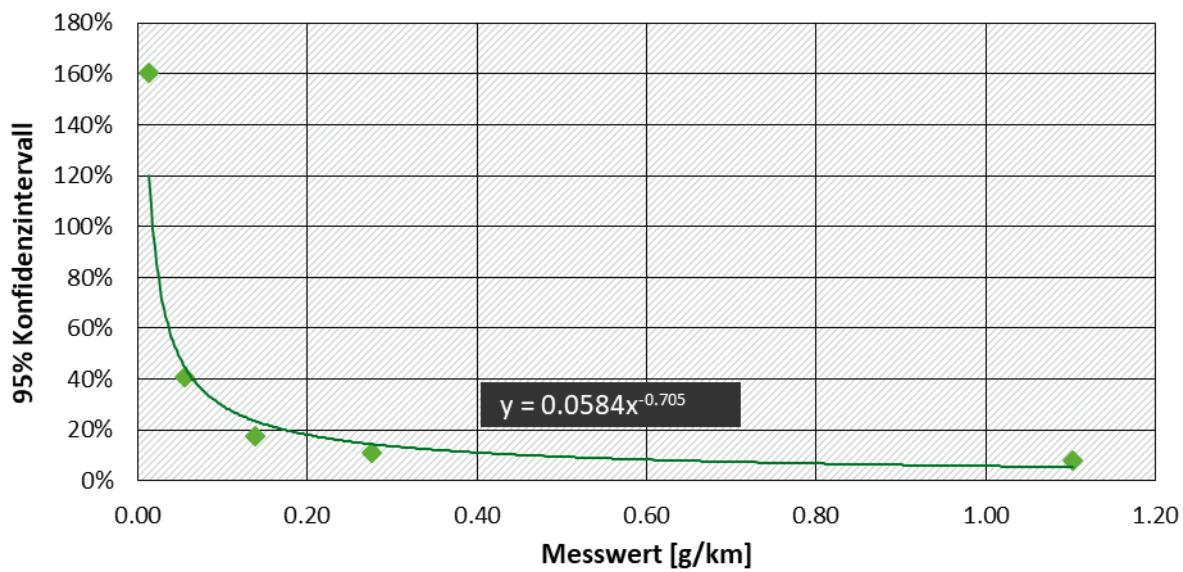
Kapitel 2.3.1.4.1 beschäftigt sich mit jenen Unsicherheiten, die implizit in den Einzelunsicherheiten der Basis-EF, enthalten sind. Die Unsicherheiten der Korrekturfaktoren und der Kaltstartzusatzemissionen werden in Kapitel 2.3.1.4.3 dargelegt.

2.3.1.4.1 Implizit in Basis-EF enthaltene Unsicherheiten

2.3.1.4.1.1 Unsicherheit Messequipment (ME) – Messunsicherheit

Die Messunsicherheit am Rollenprüfstand beinhaltet neben den Unsicherheiten der Kalibriergase, der Analysatoren und der Abgasmassenstrommessung auch noch jene der Rollensteuerung (für Drehmoment und Geschwindigkeit). Hinzu kommen die Unsicherheiten infolge der variablen Reifentemperaturen und der zeitaufgelösten Auswertung (zeitliche Zuordnung des Abgasmassenstroms zu den gemessenen Konzentrationen). Für die gesamte Messunsicherheit war keine passende Literatur verfügbar. Daher schätzten wir diese aus Datenblättern und Messdaten. Dabei erstellten wir für alle relevanten Emissionskomponenten messwertabhängige Funktionen für die Messunsicherheiten. In Abbildung 18 ist beispielhaft die Funktion für NO_x dargestellt. EURO 6-Pkw zeigen dabei Messwerte von ca. 0,02 bis 0,1 g/km. Bei sehr geringen Messwerten ist davon auszugehen, dass man sich im Bereich des LOD (Limit-Of-Detection) befindet.

Abbildung 18: Geschätzte repräsentative Messunsicherheit von NO_x als Funktion des Messwertes für alle Pkw Rollentests in der HBEFA Datenbasis



Quelle: Eigene Darstellung, FVT

2.3.1.4.1.2 Wiederholbarkeit (WH)

Unter Wiederholbarkeit ist jene Abweichung zu verstehen, welche bei den wiederholten Messungen des gleichen Fahrzeuges auftritt. Zur Bestimmung benötigten wir wiederholte Messungen desselben Fahrzeuges, im selben Zyklus, am selben Prüfstand, mit demselben Messequipment. Mit den verfügbaren Messergebnissen an Kfz, die im selben Zyklus mehr als zweimal gemessen wurden, konnte in weiterer Folge mittels Formel 4 und Formel 6 eine Standardabweichung ermittelt werden. Diese Standardabweichung umfasst neben der reinen Wiederholbarkeit auch die zuvor erwähnte Messunsicherheit. Durch Anwendung der in Formel 19 gezeigten Gleichung, welche auf der Fehlerfortpflanzung (Formel 14) basiert, berechneten wir die Wiederholbarkeit aus der Messunsicherheit und der zuvor bestimmten Standardabweichung.

Formel 19: Bestimmung der Wiederholbarkeit (WH)

$$U_{WH} = \sqrt{U_{GesWH}^2 - U_{MU}^2}$$

mit

U_{WH} - *Unsicherheit aus Wiederholbarkeit des Fahrzeugemissionsverhaltens*

U_{GesWH} - *2 x Standardabweichung der Ergebnisse wiederholter Messungen*

U_{MU} - *Messunsicherheit*

2.3.1.4.1.3 Serienstreuung (Sst)

Als Serienstreuung wird jene Abweichung bezeichnet, welche bei der Messung mehrerer unterschiedlicher Fahrzeuge des gleichen Modells auftritt. Zur Bestimmung benötigten wir mehrere Messungen desselben Fahrzeugmodells, im selben Fahrzyklus, am selben Prüfstand, mit demselben Messequipment aber nicht desselben Fahrzeuges. Mit den entsprechenden

Messergebnissen konnte in weiterer Folge wiederum mittels Formel 4 und Formel 6 eine Standardabweichung ermittelt werden. Diese Standardabweichung umfasst neben der reinen Serienstreuung die Wiederholbarkeit und die Messunsicherheit. Durch Anwendung der in Formel 20 gezeigten Gleichung, welche auf der Fehlerfortpflanzung (Formel 14) basiert, konnten wir die Messunsicherheit und die zuvor ermittelte Wiederholbarkeit aus der gesamten Standardabweichung herausrechnen. Damit erhält man die gesuchte Serienstreuung.

Formel 20: Bestimmung der Serienstreuung (Sst)

$$U_{Sst} = \sqrt{U_{GesSst}^2 - U_{WH}^2 - U_{MU}^2}$$

mit

U_{Sst} - *Unsicherheit aus Serienstreuung des Fahrzeugemissionsverhaltens*

U_{GesSst} - *2 x Standardabweichung der Ergebnisse wiederholter Messungen an gleichen Fahrzeugmodellen*

U_{WH} - *Unsicherheit aus Wiederholbarkeit des Fahrzeugemissionsverhaltens*

U_{MU} - *Messunsicherheit*

Die hier beschriebenen impliziten Unsicherheiten scheinen jeweils in den Standardabweichungen auf, die mit Messdaten an Kfz erzeugt werden. Dementsprechend dürfen sie in den „relevanten Unsicherheiten“ nicht mehrfach gezählt werden. Mehrfache Zählungen wurden wieder mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung nach Formel 14 subtrahiert.

2.3.1.4.2 Relevante Einzelunsicherheiten der Basis-EF

In diesem Kapitel sind die Methoden zur Bestimmung der einzelnen Komponenten der Unsicherheit der Emissionsfaktoren beschrieben.

2.3.1.4.2.1 Stichprobenunsicherheit

Da wir bei der Bestimmung der Stichprobenunsicherheit Messwerte herangezogen haben, sind in diesen sowohl Messunsicherheit, als auch Wiederholbarkeit, aber auch die Serienstreuung enthalten. Bei Emissionsmessungen können die Messwerte grundsätzlich nicht negativ sein. Ausnahmen treten auf, wenn man sich im Bereich des LOD befindet. Da vereinzelt sehr hoch emittierende Fahrzeuge in der Stichprobe enthalten sind, erschien eine Log-Normalverteilung hier passend. Eine entsprechende Überprüfung wurde durchgeführt. Die Verteilung der logarithmierten Messdaten entspricht einer Normalverteilung.

Somit bestimmten wir, unter Anwendung von Formel 5, Formel 7, Formel 12 und Formel 13, aus den logarithmierten Messwerten die relative untere und obere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls des Mittelwertes.

2.3.1.4.2.2 Modellunsicherheit

Für die Ermittlung der Modellunsicherheit benötigten wir einerseits Messwerte und andererseits die mit PHEM simulierten Emissionen. Gesucht ist hier die Standardabweichung zwischen Messergebnissen für Fahrzeugflotten (z. B. für alle Pkw Diesel EURO 6) und dem Simulationsergebnis mit PHEM für diese Flotten. Aufgrund der unterschiedlichen Datenlage wurden für Pkw und SNF, Busse verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Modellunsicherheit eingesetzt:

- ▶ SNF, Bus: Bei SNF und Bussen wird im Modell PHEM ein normiertes Motorkennfeld aus den Messdaten aller Größenklassen bestimmt. Mit diesem werden dann alle SNF- und Bus-Größenklassen im HBEFA berechnet. Die Fahrzeugdaten werden dabei jeweils aus den Zulassungsstatistiken der Größenklassen gebildet. Damit sind in jeder Größenklasse andere Marken und Motormodelle im Emissionskennfeld, das für die Simulation genutzt wird, als in dem – jeweils sehr kleinen – Sample der Messdaten je Größenklasse. Ein Vergleich würde daher wegen der unterschiedlichen Stichprobe keinen Anhaltswert für die Modellunsicherheit geben, sondern eher die Streuung zwischen Marken und Modellen zeigen. Daher simulierten wir bei SNF jedes einzelne Kfz und verglichen Messung mit Simulation. Aus den prozentuellen Abweichungen konnte die Standardabweichung bestimmt werden (Formel 8). Dieses Vorgehen wurde für EURO VI ABC und EURO VI D angewendet. Für die Emissionsklassen EURO III bis EURO V wurden die Daten aus (Rexeis 2009) herangezogen. Von Pre EURO I bis EURO II wurden die Werte von EURO III übernommen.
- ▶ Pkw: Bei diesen wurde die Modellunsicherheit für EURO 4-Fahrzeuge aus (Zallinger 2010) übernommen. Die dort angegebenen Werte wurden für die Emissionsklassen Pre EURO 1 bis EURO 3 als repräsentativ angenommen. Daten für eine genauere Berechnung der Unsicherheiten für EURO-Klassen vor EURO 4 sind nicht verfügbar. Für EURO 5 bis EURO 6d wurde die Modellunsicherheit von EURO 6 ab übernommen. Für die Bestimmung der Unsicherheiten von EURO 6 ab wurde ein gemitteltes Emissionskennfeld und dazu die gemittelten Fahrzeugdaten als Modelleingabe verwendet. Durch Gewichtung der Fahrzeuge bei der Kennfeld- und Fahrzeugdatenerstellung wurde ein gewichteter Simulationswert berechnet. Um aus den wenigen gemeinsamen Zyklen eine ausreichende Anzahl an vergleichbaren Simulationsergebnissen und Messwerten zu generieren, wurden die Testzyklen in Subzyklen unterteilt. Die Messdaten wurden nach Marken und Typen gleich gewichtet, wie für die Modelleingabe. Mit diesem Vorgehen konnten aus den Zyklen neun gewichtete Messwerte und neun dazugehörige Simulationswerte für die Durchschnittsfahrzeuge bestimmt werden. Mittels Formel 8 bestimmten wir aus den simulierten Werten und den dazugehörigen Messwerten eine Standardabweichung.

Für eine möglichst gute Modellqualität im HBEFA wurden meist alle Messdaten zur Modellerstellung verwendet (Weller 2020). Damit sind keine unabhängigen Messdaten für eine korrekte Unsicherheitsbestimmung aus HBEFA Anwendungen verfügbar. Wir haben daher für diejenigen Kfz, für die mehr Zyklen gemessen waren, als zur Kennfelderzeugung im Simulationsmodell PHEM nötig ist, neue Kennfelder aus reduzierten Messdaten erzeugt und die unabhängigen Tests dieser Kfz damit in PHEM nachgerechnet.

Für diejenigen Kfz, für die keine unabhängigen Zyklen bzw. nur Rollenmessungen vorhanden waren, wurden deshalb die Unsicherheiten aus den vorhandenen Daten berechnet und mittels Aufschlägen auf die zu erwartende Unsicherheit hochgerechnet.

Aufschläge auf Rollenmessungen sollen Umgebungseinflüsse wie Wind und Straßenbeschaffenheit berücksichtigen. Die Aufschläge wurden aus Daten von Kfz ermittelt, bei denen sowohl Straßen-, als auch Rollentests durchgeführt wurden. Aufschläge auf Ergebnisse aus der Simulation gleicher Zyklen, wie sie für die Kennfelderstellung genutzt wurden, konnten aus dem o. a. Subsample mit vielen gemessenen Zyklen bestimmt werden, indem einmal die Unsicherheit mit unabhängigen und einmal mit abhängigen Zyklen berechnet wurde.

Die so berechnete Standardabweichung enthält sowohl Messunsicherheit als auch Wiederholbarkeit. Da diese jedoch nicht doppelte Berücksichtigung finden sollten und bereits bei der Stichprobenunsicherheit berücksichtigt wurden, rechneten wir sie mittels Formel 21,

welche auf der Fehlerfortpflanzung (Formel 14) basiert, aus der gesamten Standardabweichung heraus.

Formel 21: Bestimmung der Modellunsicherheit

$$U_{Sim} = \sqrt{U_{GesSim}^2 - U_{WH}^2 - U_{MU}^2}$$

mit

U_{Sim} - Unsicherheit aus der Simulation der Emissionsfaktoren (Modellunsicherheit)

U_{GesSim} - 2 x Standardabweichung zwischen Messwerten und Simulation

U_{WH} - Unsicherheit aus Wiederholbarkeit des Fahrzeugemissionsverhaltens

U_{MU} - Messunsicherheit

Bei niedrigen Emissionswerten können aufgrund hoher Messunsicherheiten sowie hoher Unsicherheiten aus der Wiederholbarkeit unplausible Unsicherheiten bzw. negative Werte unter der Wurzel auftreten. In diesen Fällen treffen wir folgende Annahme: Die gesamte Unsicherheit setzt sich zu gleichen Teilen aus Messunsicherheit, Wiederholbarkeit und Modellunsicherheit zusammen. Damit kann wiederum aus der Fehlerfortpflanzung die Modellunsicherheit bestimmt werden.

2.3.1.4.2.3 Unsicherheit HBEFA Verkehrssituationen (TS)

Für Pkw und SNF unterscheiden sich die für die Analyse verfügbaren Verkehrsdaten. Daher ist auch das Vorgehen bei der Bestimmung der Unsicherheit der HBEFA- Verkehrssituationen unterschiedlich.

Zur Bestimmung der Unsicherheit der Verkehrssituationen (Traffic Situation, TS) von Pkw simulierten wir für eine Vielzahl an Zyklen die Emissionen mit PHEM. Die verwendeten Zyklen stammen aus On-Board Aufzeichnungen im Raum Bern, denen gewisse TS zugeordnet werden können. Aus den einzelnen Ergebnissen je TS berechneten wir mittels Formel 4, Formel 6, Formel 10 und Formel 11 die relative Unsicherheit. Mittels Gewichtungsfaktoren für die Verkehrssituation in der Schweiz konnten dann die zyklusspezifischen Unsicherheiten gewichtet und eine repräsentative mittlere Standardabweichung ermittelt werden. Da gegenüber dem TS-Sample aus Bern für den gesamten deutschen Raum eine etwas höhere Variabilität zu erwarten ist, schlugen wir auf die Unsicherheit der Berner Daten 25 % auf. Die Auswertung erfolgte für die Emissionsklassen EURO 5, EURO 6ab und EURO 6d-TEMP sowohl für Diesel- als auch Benzinfahrzeuge. Für frühere Emissionsklassen wurden die Unsicherheiten von EURO 5 übernommen.

Für die Bestimmung der Unsicherheit aus der Auswahl der repräsentativen Zyklen je TS von SNF zogen wir an der TU-Graz vermessene Zyklen heran, die jeweils dieselben Verkehrssituationen umfassen. Aus den einzelnen Ergebnissen je Zyklus bestimmten wir mittels Formel 4, Formel 6, Formel 10 und Formel 11 die relative Unsicherheit des Mittelwertes.

2.3.1.4.2.4 Unsicherheit Beladungseinfluss

Für SNF stehen in HBEFA die Emissionsfaktoren für unbeladen, halb und voll beladen zur Verfügung. Die Unsicherheit ergibt sich also aus der angenommenen Beladung und wird in der nachgelagerten Monte-Carlo Simulation durch Variationen der Beladungen berücksichtigt.

Um bei Pkw die Unsicherheiten aus den in der Simulation vorgegebenen Beladungen, Fahrwiderständen usw. zu bestimmen, führten wir PHEM-Simulationen einmal mit den Daten nach HBEFA 4.2 sowie einmal mit „Best Case“ Fahrzeugsettings durch. Durch Einsetzen der Simulationsergebnisse der beiden Settings in Formel 8, Formel 9 und Formel 11 berechneten wir die untere Schranke des 95%-Konfidenzintervalls. Da die Beladung und die Fahrwiderstände nach HBEFA 4.2 schon eher hohe Werte aufweisen, wurde die obere Schranke des 95%-Konfidenzintervalls als 20 % der unteren Schranke definiert.

2.3.1.4.2.5 Steigungunsicherheit

Durch die Verwendung konstanter mittlerer Steigungen in den HBEFA Zyklen ergibt sich eine Unsicherheit gegenüber der Realität. Zur Abschätzung der Unsicherheit teilten wir einen gemessenen, repräsentativen RDE-Zyklus mit etwa 90 km Länge in Teilabschnitte auf. Diese Teilabschnitte simulierten wir einmal mit konstanten, durchschnittlichen Steigungen, und einmal mit den real gemessenen Steigungen. Mithilfe der erhaltenen Simulationsergebnisse bestimmten wir eine Standardabweichung mittels Formel 8. Mit Formel 9 und Formel 11 berechneten wir dann die relative Steigungunsicherheit.

2.3.1.4.3 Unsicherheiten der Korrekturfaktoren und der Kaltstartzusatzemissionen

2.3.1.4.3.1 Unsicherheit Temperaturkorrekturfaktor

Der Temperaturkorrekturfaktor berücksichtigt im HBEFA bei Pkw und LNF mit Dieselmotoren den Effekt, dass die Abgasrückführung (AGR) bei niederen Temperaturen reduziert wird, um Kondensation und damit verbundene Schäden zu vermeiden. Zusätzlich wird damit auch der Effekt des „Thermofensters“ berücksichtigt, der beschreibt, dass auch über das notwendige Maß hinaus AGR und auch AdBlue Dosierung bei SCR Katalysatoren bei Temperaturen unter- und oberhalb des Typprüfbereiches des NEDC (20 bis 30°C), von der Motorsteuerung zurückgenommen wurden.

Die Temperaturkorrekturfaktoren für Pkw und LNF wurden für HBEFA 4.1 aus Remote Sensing Messdaten aus Schweiz, Spanien, Schweden und England ermittelt (Matzer et al. 2019). Für HBEFA 4.2 wurde kein Update der Temperaturkorrekturfaktoren vorgenommen. Die Unsicherheiten, die für die Auswertungen der einzelnen Datensätze angegeben wird, ist im Bereich weniger Prozent, allerdings sind die Unterschiede der Temperaturabhängigkeiten zwischen den einzelnen Remote Sensing Quellen deutlich höher, als die je Quelle angegebenen Unsicherheiten, jeweils für gleiche Kfz-Schichten und Temperaturbereiche. Offensichtlich sind Unsicherheiten aus der Lage der Messstellen (dort vorherrschende Fahrzustände) und eventuell der Messgeräte groß. Eine Zusammenführung aller Daten, inklusive neuer Messungen, mit einer gesamtheitlichen Auswertung nach allen relevanten Einflüssen empfehlen wir für HBEFA 5.1, dabei sollten auch gleich die Unsicherheiten bestimmt werden. Für diese Studie haben wir die Temperaturkorrekturfaktoren aus den einzelnen Literaturstellen bestimmt und dann deren Standardabweichung und die Unsicherheit des Mittelwertes des Temperaturkorrekturfaktors berechnet.

2.3.1.4.3.2 Unsicherheit Alterungskorrekturfaktor

Der Alterungsfaktor beschreibt im HBEFA den Einfluss steigender Laufleistungen der Kfz je Schicht auf deren Emissionsfaktoren.

Die Alterungskorrekturfaktoren für Pkw und LNF wurden für HBEFA 4.1 ebenfalls aus Remote Sensing Messdaten aus Schweiz, Spanien, und England ermittelt (Matzer et al. 2019). Für HBEFA 4.2 wurde kein Update der Alterungskorrekturfaktoren vorgenommen. Wie schon beim Temperaturkorrekturfaktor beschrieben, ist die je Datenquelle angegebene Unsicherheit deutlich kleiner als die zwischen den Datenquellen. Für diese Studie haben wir wiederum die Alterungskorrekturfaktoren aus den einzelnen Literaturstellen bestimmt und dann deren Standardabweichung und die Unsicherheit des Mittelwertes der Alterungskorrekturfaktoren berechnet.

Für SNF wurden für HBEFA 4.2 erstmals Alterungsfaktoren bestimmt (Notter et al. 2021). Dafür wurden alle Remote Sensing Daten in einer Datenbank an der TU Graz gesammelt und nach Einflüssen des Fahrzustandes (Innerorts, Autobahn), Temperatur und Fahrzeugalter analysiert. Aus den einzelnen Daten, die außer Fahrzeugalter ähnliche Zustände haben wurden für HBEFA 4.2 die Alterungskorrekturfunktionen für die SNF und jetzt auch die Unsicherheiten bestimmt. Dazu wurde die Standardabweichung je SNF-Schicht und damit die Unsicherheit des Mittelwertes der Korrekturfaktoren bestimmt.

2.3.1.4.3.3 *Unsicherheit Kaltstartzusatzemissionen*

Die Unsicherheiten aus den Kaltstartzusatzemissionen von Pkw wurden direkt aus den zugrundeliegenden Messdaten berechnet. Die Kaltstartzusatzemissionen der Pkw für HBEFA wurden seinerzeit aus dem IUFC Test von Infras berechnet. Die zugehörigen Daten wurden von Mario Keller freundlicherweise für diese Studie ausgehoben und zur Verfügung gestellt. Aus den Messdaten konnten die Standardabweichungen und damit die Unsicherheiten der Mittelwerte je Pkw-Schicht und Schadstoff bestimmt werden. Die Stichprobe bei Kaltstartzusatzemissionen ist generell viel geringer als für die betriebswarmen Emissionen, da nur Messungen im IUFC-Zyklus in der derzeitigen Methode Eingang finden und diese auch bei verschiedenen Starttemperaturen erfolgt sein müssen.

Wesentliche Einflussfaktoren für den Kaltstart, nämlich die Parkdauer vor und die Strecke nach Start, sind scheinbar länger nicht mehr angepasst worden. Es scheinen auch keine passenden Messdaten vorhanden zu sein. Wir können für diese Einflüsse daher auch keine Unsicherheit angeben.

Bei SNF sind bis EURO V eher geringe Kaltstartzusatzemissionen zu erwarten, da deren Katalysatoren im Innerortsbetrieb oft unter Betriebstemperatur sind. Seit EURO VI (Einführung On-Board Tests) sind die betriebswarmen Emissionen auch innerorts relativ niedrig und damit steigt die Relevanz der Kaltstartzusatzemissionen. Für die Unsicherheitsanalyse könnte für die EURO VI SNF als grobe Abschätzung mit Zusatzemissionen zwischen ca. 60 und 100% der warmen Emissionen (normalverteilte Unsicherheit) gerechnet werden, siehe (Hausberger und Weller 2018).

2.3.1.5 **Ergebnisse Pkw/LNF**

Aus den in Kapitel 2.3.1.4 beschriebenen Einzelunsicherheiten wurden, unter Anwendung des in Kapitel 2.3.1.3.3 beschriebenen Vorgehens, die unteren und die oberen Schranken des 95%Konfidenzintervalls der Basis EF berechnet.-

2.3.1.5.1 Unsicherheiten der Basis Emissionsfaktoren von Pkw und LNF der Kategorie N1 Klasse 1 (LNF N1 I)

Die Unsicherheitsanalyse erfolgte für Pkw und LNF anhand der verfügbaren Pkw-Daten. Für LNF der Kategorie N1 I waren keine ausreichenden Daten vorhanden, um Emissionsfaktoren und die Unsicherheiten des HBEFA 4.2 Datensatzes zu bestimmen. Da die Emissionsfaktoren für LNF der Klasse N1-I für HBEFA auch mit den Pkw-Emissionskennfeldern berechnet wurden, ist die gemeinsame Betrachtung die einzige Möglichkeit die Unsicherheit für N1-I Kfz zu schätzen.

Die von uns ermittelten Unsicherheiten der Basis-Emissionsfaktoren sind für Pkw und LNF N1 I für Dieselfahrzeuge in Anhang (A.1.1) und für Benzinfahrzeuge in Anhang (A.1.2) aufgelistet. Exemplarisch sind die Unsicherheiten für NO_x-Emissionen der Dieselfahrzeuge in Tabelle 23 dargestellt. Dabei wird zwischen Innerorts, Außerorts und Autobahn (jeweils untere Schranke des 95%-Konfidenzintervalls (UG) und obere Schranke des 95%-Konfidenzintervalls (OG)) unterschieden.

Besonders ist auf die Emissionsklasse EURO 6d hinzuweisen. Hier waren nur Messdaten von zwei Fahrzeugen verfügbar, was rechnerisch unplausibel hohe Unsicherheiten zur Folge hätte. Daher haben wir die Stichproben- und Modellunsicherheiten von EURO 6d-TEMP übernommen. Diese beiden Unsicherheiten haben den größten Anteil an der mittels Fehlerfortpflanzung ermittelten Gesamtunsicherheit. Die Empfehlung an dieser Stelle ist, weitere Fahrzeuge der EURO 6d-Abgasnorm zu vermessen, um eine eindeutige Aussage für EURO 6d-Fahrzeuge treffen zu können.

Tabelle 23: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-Pkw/LNF N1 I – NO_x

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1	-44%	66%	-35%	47%	-27%	34%
EURO 1	-27%	34%	-25%	30%	-26%	33%
EURO 2	-26%	32%	-26%	32%	-27%	33%
EURO 3	-26%	32%	-26%	32%	-27%	34%
EURO 4	-26%	32%	-26%	32%	-26%	33%
EURO 5	-53%	89%	-53%	88%	-53%	88%
EURO 6abc	-54%	90%	-54%	90%	-54%	91%
EURO 6d-TEMP	-75%	180%	-74%	172%	-71%	157%
EURO 6d*	-75%	180%	-74%	172%	-71%	157%

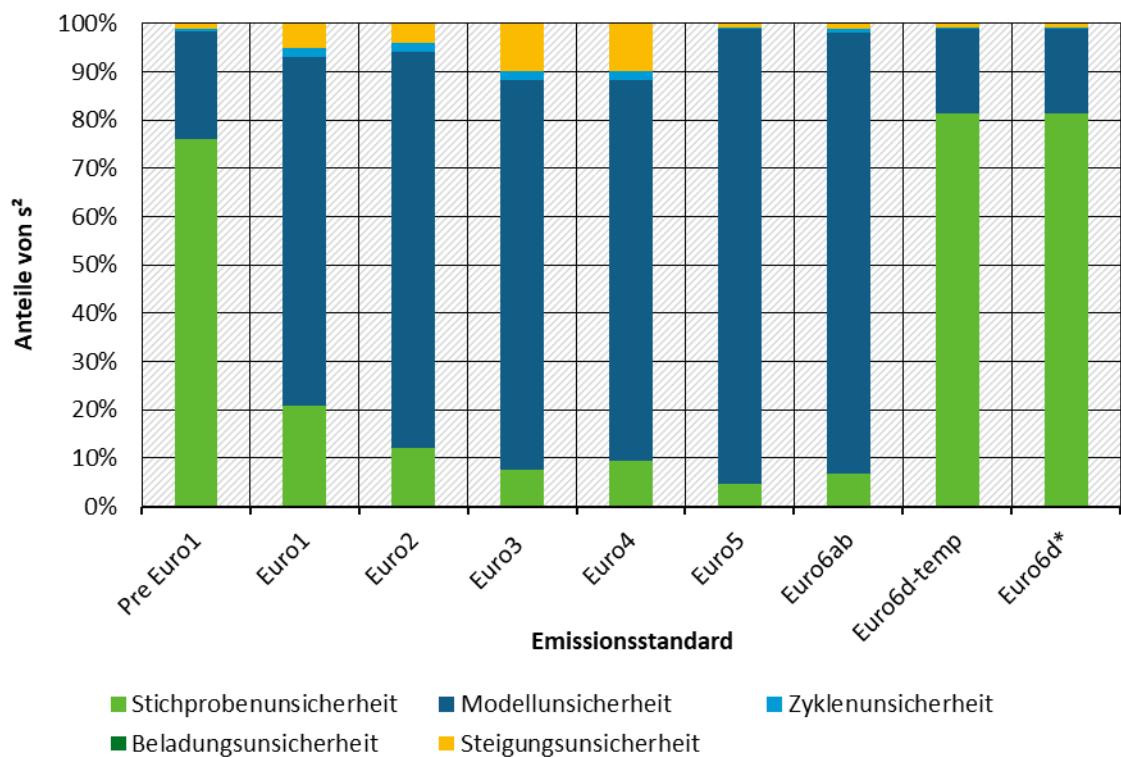
Anmerkung: *Stichproben- und Modell-UNSicherheiten von EURO 6d-TEMP übernommen.

In Abbildung 19 sind exemplarisch die prozentualen Anteile der Einzelunsicherheiten an der Gesamtunsicherheit der Basis-EF für die innerörtlichen NO_x-Emissionen (OG) dargestellt. Wie zu erkennen ist, resultiert aus einer kleinen Stichprobe, wie es z. B. bei EURO 6d-TEMP im HBEFA 4.2 der Fall war, ein hoher prozentualer Anteil der Stichprobenunsicherheit an der Gesamtunsicherheit. Bei größeren Stichprobenanzahlen dominiert hingegen die Modellunsicherheit. Bei den EURO 6d-TEMP und 6d Pkw war die Stichprobe für HBEFA 4.2 noch relativ klein.

Für EURO 6d-TEMP sind seit Abschluss des HBEFA 4.2 relativ viele Messdaten in die Datenbank zum HBEFA (DBEFA) eingeflossen, die Unsicherheit dieser Emissionsschicht wird im HBEFA 5.1 also deutlich kleiner werden als hier angegeben. Für EURO 6d ist die Stichprobe derzeit aber immer noch gering. Für Kaltstartemissionen sind jeweils deutlich geringere Stichproben als für die betriebswarmen Emissionen verfügbar, da das Kaltstartmodell sehr umfangreiche Tests bei verschiedenen Starttemperaturen verlangt. Hier empfehlen wir eine Erweiterung des Ansatzes, mit der auch PEMS Messdaten zur Parametrierung der Kaltstartemissionen nutzbar gemacht werden.

Außerdem kann sich der Anteil von Modellunsicherheit und Stichprobenunsicherheit je nach Emissionskomponente stark unterscheiden. Für alle Emissionskomponenten gilt jedoch, dass die Zyklenunsicherheit, die Beladungsunsicherheit und die Steigungsunsicherheit anteilmäßig einen geringen Einfluss haben.

Abbildung 19: Anteile der Einzelunsicherheiten an der mittels Fehlerfortpflanzung bestimmten Gesamtunsicherheit – Diesel-Pkw/LNF N1 I – NO_x – Innerorts (OG)



* Modellunsicherheit und Stichprobenunsicherheit von Euro6d-temp übernommen

Quelle: Eigene Darstellung, FVT.

2.3.1.5.2 Unsicherheiten der Basis Emissionsfaktoren von LNF der Kategorien N1 Klasse 2 und der Klasse 3 (LNF N1 II und N1 III)

Neue, umfangreichere Messdaten an EURO 6-LNF der Klassen N1-II und N1-III werden erst in HBEFA 5.1 Eingang finden und können nicht zur Bewertung des HBEFA 4.2 verwendet werden.

Für die älteren EURO Klassen dieser Kategorien sind nur wenige Daten vorhanden. Aus diesem Grund wurden die Unsicherheiten von Pkw übernommen und wie folgt adaptiert:

- ▶ Für Benzinfahrzeuge zogen wird die Gesamtunsicherheiten von Benzin-Pkw heran und schlugen 25 % auf, um die wegen der schlechten Datengrundlagen vermutlich höheren Unsicherheiten abzudecken.
- ▶ Für Dieselfahrzeuge von Pre EURO 1 bis EURO 6c zogen wir die Stichprobenunsicherheit von Pkw heran. Mittels eines Vergleiches der Stichprobenanzahl der Pkw und der Stichprobenanzahl der LNF legten wir die Stichprobenunsicherheit auf LNF um. Alle weiteren Einzelunsicherheiten beließen wir gleich wie bei Pkw. Mittels Fehlerfortpflanzung bestimmten wir dann die gesamten Unsicherheiten.
- ▶ Für Euo 6d-TEMP- und EURO 6d-Dieselfahrzeuge wurde wiederum ein 25 % Aufschlag auf die Gesamtunsicherheiten von Pkw angewendet.

Die von uns ermittelten Unsicherheiten der Basis-Emissionsfaktoren sind für Dieselfahrzeuge der Kategorie N1 II und N1 III im Anhang (A.2.1) und für Benzinfahrzeuge im Anhang (A.2.2) aufgelistet. Exemplarisch sind die Unsicherheiten der NO_x-Emissionen der Diesel-LNF N1 II in Tabelle 24 dargestellt. Dabei wird zwischen innerorts, außerorts und Autobahn sowie zwischen unterer (UG) und oberer Schranke (OG) des 95%-Konfidenzintervalls unterschieden.

Tabelle 24: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 II – NO_x

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1*	-34%	47%	-29%	37%	-26%	32%
EURO 1*	-26%	33%	-25%	30%	-26%	32%
EURO 2*	-34%	46%	-36%	49%	-39%	55%
EURO 3*	-32%	42%	-29%	37%	-38%	53%
EURO 4*	-33%	44%	-32%	42%	-33%	44%
EURO 5*	-59%	106%	-57%	100%	-57%	99%
EURO 6abc*	-61%	114%	-61%	114%	-62%	117%
EURO 6d-TEMP**	-82%	229%	-81%	219%	-78%	200%
EURO 6d**	-82%	229%	-81%	219%	-78%	200%

Anmerkungen: *Aufschläge auf Stichprobenunsicherheit über Verhältnis der Stichprobengröße; **Aufschlag 25 % auf gesamte Unsicherheit.

2.3.1.5.3 Unsicherheiten der Korrekturfaktoren Pkw und LNF

Die Korrekturfaktoren sind für Pkw und LNF N1 I bis III im HBEFA identisch. Dementsprechend sind auch deren Unsicherheiten als identisch angenommen. Die geringere Datengrundlage für LNF und insbesondere der Umstand, dass für diese keine eigenen Faktoren erhoben wurden, lassen eine größere Unsicherheit vermuten. Eine eigene Auswertung der LNF-Korrekturfaktoren aus den Remote Sensing Messdaten war bislang aber wegen den zu geringen Stichproben nicht möglich.

In HBEFA 4.2 gibt es eine Temperaturkorrekturfunktion für NO_x-Emissionen bei Pkw- und LNF-Dieselfahrzeugen. Die Unsicherheit des Korrekturfaktors (bezogen auf den Korrekturfaktor selbst) ist in Tabelle 25 dargestellt. Für EURO 6d-TEMP- und EURO 6d-Fahrzeuge ergeben sich

sehr hohe Unsicherheiten, dies ist auf die niedrigen Korrekturwerte zurückzuführen. Des Weiteren sind die absoluten NO_x-Emissionen sehr gering.

Tabelle 25: Unsicherheiten Korrekturfaktoren für Temperatur – Diesel- Pkw/LNF

Emissionsklasse	Unsicherheit des Korrekturfaktors
Pre EURO 1 – EURO 3	25%
EURO 4 – EURO 5	51%
EURO 6ab	46%
EURO 6c	65%
EURO 6d-TEMP – EURO 6d*	329%

Anmerkung: *Sehr niedrige Korrekturwerte bei niedrigen absoluten Emissionen.

Die Unsicherheiten des Korrekturfaktors der Alterung sind in Tabelle 26 und Tabelle 27 ersichtlich.

Tabelle 26: Unsicherheiten Korrekturfaktor für Alterung – Diesel-Pkw/LNF

Emissionsklasse	NO _x	CO	HC	PM
Pre EURO 1 – EURO 4	21%	43%	43%	43%
EURO 5	4%	20%	20%	20%
EURO 6abc – EURO 6d	6%	30%	30%	30%

Tabelle 27: Unsicherheiten Korrekturfaktor für Alterung – Benzin-Pkw/LNF

Emissionsklasse	NO _x	CO	HC	PM
Pre EURO 1 – EURO 4	30%	22%	22%	22%
EURO 5	12%	24%	24%	24%
EURO 6abc – EURO 6d	17%	36%	36%	36%

Für den Kaltstartzusatzfaktor wird die Unsicherheit der Emissionen pro Start angegeben. In Tabelle 28 sind jene für Dieselfahrzeuge und in Tabelle 29 jene für Benzinfahrzeuge dargestellt.

Tabelle 28: Unsicherheiten des Kaltstartzusatzfaktors [g/Start] – Diesel-Pkw/LNF

Emissionsklasse	NO _x (UG)	NO _x (OG)	CO (UG)	CO (OG)	HC (UG)	HC (OG)	PM (UG)	PM (OG)
Pre EURO 1 – EURO 5	83%	83%	81%	81%	78%	78%	81%	81%
EURO 6ab	95%	104%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
EURO 6c	95%	1655%	79%	79%	76%	76%	79%	79%
EURO 6d-TEMP – EURO 6d	71%	71%	95%	117%	88%	88%	95%	117%

Tabelle 29: Unsicherheiten des Kaltstartzusatzfaktors [g/Start] – Benzin-Pkw/LNF

Emissionsklasse	NO _x (UG)	NO _x (OG)	CO (UG)	CO (OG)	HC (UG)	HC (OG)	PM (UG)	PM (OG)
Pre EURO 1 – EURO 5	73%	73%	75%	75%	69%	69%	75%	75%
EURO 6ab	65%	65%	78%	78%	62%	62%	78%	78%
EURO 6c	67%	67%	76%	76%	62%	62%	76%	76%
EURO 6d-TEMP – EURO 6d	67%	67%	76%	76%	62%	62%	76%	76%

2.3.1.6 Ergebnisse SNF

Für die Berechnung der Gesamtunsicherheiten der Basis-EF von SNF und Busse wurde dieselbe Vorgehensweise wie bei Pkw und LNF herangezogen (siehe Kapitel 2.3.1.3.3).

2.3.1.6.1 Unsicherheiten der Basis Emissionsfaktoren von SNF

Die Kategorie SNF umfasst Sattelzugmaschinen (SZ) und Verteiler-Lkw (VL). Bei den Bussen werden Reisebusse (RB) und Stadtbusse (SB) zusammengefasst. Zufolge der geringen Anzahl an verfügbaren Fahrzeugmessdaten werden die Emissionsfaktoren des HBEFA aus Emissionskennfeldern bestimmt, die aus allen gemessenen SNF und Busse einer Emissionsklasse nach Flottenanteilen gewichtet werden. Dementsprechend ist die Unsicherheitsanalyse auch nur für die Gesamtheit der SNF und Busse durchführbar. Die von uns ermittelten Unsicherheiten der Basis-Emissionsfaktoren für SNF und Busse sind in Anhang (A.3) aufgelistet. Exemplarisch für NO_x sind diese in Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 30: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – SNF und Busse – NO_x

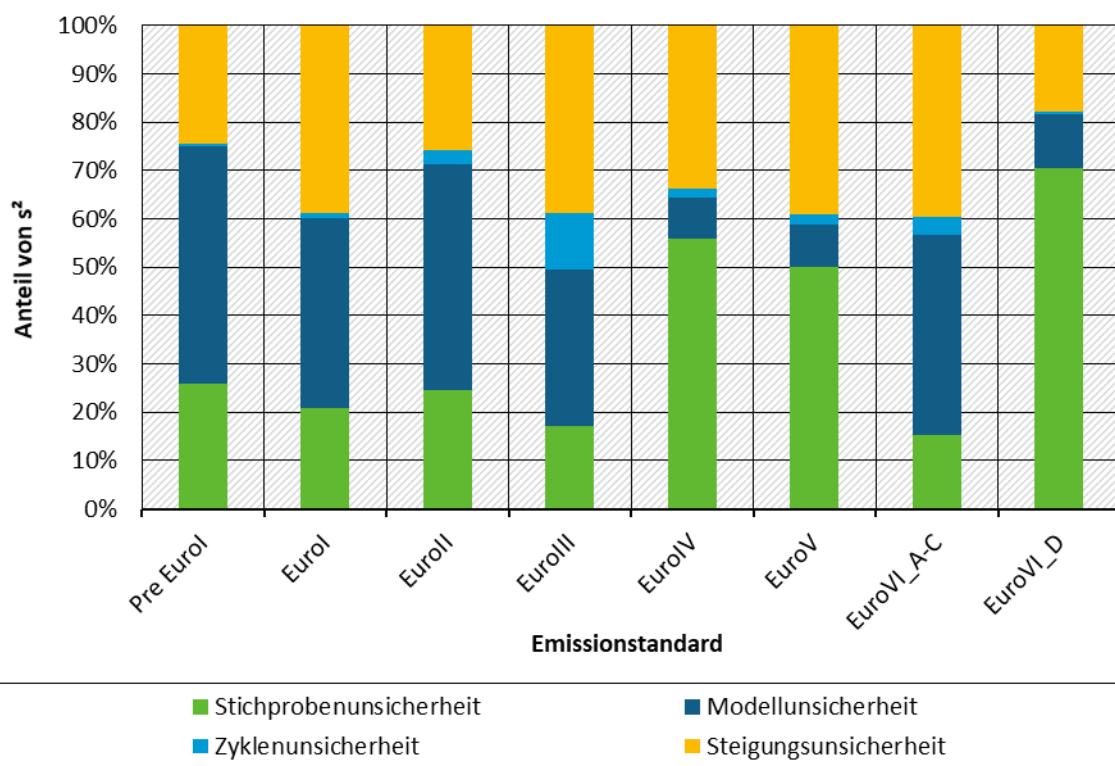
Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO I	-5%	5%	-5%	5%	-5%	5%
EURO I	-6%	6%	-6%	6%	-6%	6%
EURO II	-5%	5%	-5%	5%	-5%	5%
EURO III	-6%	6%	-7%	7%	-7%	7%
EURO IV	-30%	39%	-30%	39%	-30%	39%
EURO V	-36%	49%	-36%	49%	-36%	49%
EURO VI A-C	-58%	104%	-58%	103%	-58%	103%
EURO VI D	-75%	178%	-75%	177%	-75%	177%

In Abbildung 20 sind exemplarisch die prozentualen Anteile der Einzelunsicherheiten an der ermittelten Gesamtunsicherheit der Basis-EF für die innerörtlichen NO_x-Emissionen (OG) dargestellt. Bei den aktuellen EURO VI D zertifizierten Nutzfahrzeugen sind bislang auch für kommende Updates noch sehr wenig gemessene Kfz verfügbar. Auch ist die Annahme, dass normierte Kennfelder über alle Leistungsklassen gemittelt ein repräsentatives Emissionsverhalten jeder SNF- und Bus-Größenklasse ergeben nicht bewiesen. Wegen der geringen Stichproben bei SNF und Bussen muss dieser Weg bei der Emissionssimulation mit

PHEM gegangen werden, andernfalls wären mehrere Größenklassen gar nicht mit Messdaten belegt. Die Unsicherheit aus diesem Vorgehen konnte – mangels ausreichender Messdaten in verschiedenen Größenklassen – nicht bestimmt werden.

Die Anteile der Einzelunsicherheiten können sich – gleich wie bei Pkw – je nach Emissionskomponente unterscheiden. Im Fall von SNF und Bussen hat die Steigungsunsicherheit aufgrund der höheren Fahrzeugmassen einen höheren Anteil als bei Pkw.

Abbildung 20: Anteile der Einzelunsicherheiten an der mittels Fehlerfortpflanzung bestimmten Gesamtunsicherheit – SNF und Busse – NO_x – Innerorts (OG)



Quelle: Eigene Darstellung, FVT.

2.3.1.6.2 Unsicherheiten der Korrekturfaktoren SNF und Busse

Wie in Kapitel 2.3.1.2 beschrieben, findet in HBEFA 4.2 für SNF und Busse keine NO_x-Temperaturkorrektur statt, ebenfalls werden keine Kaltstartzusatzemissionen berücksichtigt. Für NO_x- und CO-Emissionen sind Korrekturfaktoren für die Alterung in Verwendung.

In Tabelle 31 sind deren Unsicherheiten für Sattelzugmaschinen (SZ) und Reisebusse (RB) angegeben. In Tabelle 32 selbiges für Verteiler-Lkw (VL) und Stadtbusse (SB) dargestellt. Diese Unterscheidung ist auch im HBEFA für die Korrekturfaktoren für die Alterung getroffen.

Tabelle 31: Unsicherheiten des Korrekturfaktors für die Alterung – SZ – RB

Emissionsklasse	NO _x Innerorts	NO _x Überland	NO _x Autobahn	CO Innerorts	CO Überland	CO Autobahn
vor EURO VI	4%	3%	3%	6%	6%	6%
EURO VI A-D	6%	3%	3%	5%	9%	9%

Tabelle 32: Unsicherheiten des Korrekturfaktors für die Alterung – VL – SB

Emissionsklasse	NO _x Innerorts	NO _x Überland	NO _x Autobahn	CO Innerorts	CO Überland	CO Autobahn
vor EURO VI	4%	3%	3%	6%	6%	6%
EURO VI A-D	8%	6%	6%	8%	15%	15%

2.3.1.7 Schlussfolgerungen/Verbesserungspotential

Nachfolgenden wird auf jene Punkte eingegangen, für die wir ein Verbesserungspotential erkannten.

Bei entsprechender Relevanz des Beitrages der leichten Nutzfahrzeuge an den Unsicherheiten der gesamten Verkehrsemissionen sollten grundsätzlich mehr Messungen der verschiedenen Kategorien (LNF N1 I, II und III) durchgeführt werden. Ab EURO 6 sind bereits mehr LNF-Messdaten in der DBEFA verfügbar, vorwiegend aus einem Projekt des UBA Deutschland. Ältere LNF nachzumessen erscheint wenig sinnvoll, EURO 6d-TEMP und 6d LNF wären für eine passende Stichprobe aber noch zu vermessen.

Sowohl für die Ermittlung der Wiederholbarkeit als auch für Serienstreuung sind einige Voraussetzungen zu erfüllen. Es müssen mehrere Messungen desselben Fahrzeuges und ebenfalls mehrere Messungen desselben Fahrzeugmodells (aber mit unterschiedlichen Fahrzeugen) durchgeführt werden. Diese haben im selben Zyklus, am selben Prüfstand und mit demselben Messequipment zu erfolgen. Diese Anforderungen sollten im Messprogramm berücksichtigt werden, wenn eine bessere Abschätzung der Unsicherheiten gewünscht ist.

Für die Stichprobenunsicherheit ist die Stichprobengröße ein ausschlaggebender Parameter. Mit steigender Stichprobenanzahl nimmt die Unsicherheit (auch in Formel 10 ersichtlich) ab. Bei wichtigen Kfz-Schichten sollte eine Stichprobe von zumindest 10 Kfz angestrebt werden. Bei stark streuenden Emissionsniveaus ggf. auch mehr. Ein ausreichender Beitrag aller HBEFA-Länder zu Kfz-Messungen ist daher für eine geringe Unsicherheit der Niveaus der Emissionsfaktoren wesentlich.

Für die korrekte Bestimmung der Modellunsicherheit benötigt man Messdaten, die nicht zur Modellbildung verwendet wurden. Da die Messprogramme meist kostengünstig gestaltet werden und damit nur Tests umfassen, die auch für die Modellerstellung genutzt werden (müssen), bleiben keine unabhängigen Messdaten zur Bewertung der Modellunsicherheit. Wenn man die Modellunsicherheit besser bewerten will, müsste man sich auf zumindest einen zusätzlichen Test einigen, der nicht für die Modellerstellung gebraucht wird und der durchschnittliches Fahren innerorts, außerorts und auf Autobahnen abbildet.

Die Unsicherheit der Kaltstartzusatzemissionen könnte unterbewertet sein, da bisher nur ein einziger Fahrzustand (IUFC Zyklus) für diese Emissionsfaktoren genutzt wurde. Die Abhängigkeit vom Fahrzustand ist also nicht erfasst. Noch wesentlicher scheint, dass scheinbar für die Abhängigkeit der Abstelldauer vor Kaltstart für Parkzeiten unter sechs Stunden keine aktuellen Messdaten verfügbar sind. Wir können daher auch keine Unsicherheiten dazu angeben. Da die betriebswarmen Emissionen neuer Kfz schon sehr niedrig sind, ist ein stark steigender prozentueller Anteil der Kaltstartemissionen an den Gesamtemissionen zu erwarten. Dementsprechend sollten diese in kommenden Updates besser abgebildet werden. Dazu wäre auch eine Methode wünschenswert, mit der auch PEMS-Daten für die Berechnung der Kaltstartzusatzemissionen nutzbar sind, da damit die Stichprobengröße stark steigen würde.

2.3.2 Schichtemissionsfaktoren nicht-regulierter Schadstoffe

2.3.2.1 Bestimmung der Einzelunsicherheiten

Die Unsicherheiten der Schichtemissionsfaktoren der im ZSE geführten nicht-regulierten Schadstoffe wurden, soweit möglich, anhand der gleichen Quellen ermittelt wie die im HBEFA hinterlegten Emissionsfaktoren selbst. Da letztere entweder direkt auf Messwerten aus der DBEFA beruhen oder aus dem EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2019 (EMEP/EEA 2019; Mellios et al. 2019; Ntziachristos und Samaras 2019) stammen, impliziert dies in den meisten Fällen die Auswertung der DBEFA-Messwerte bzw. die Übernahme der Unsicherheit aus dem EMEP/EEA-Guidebook. Letzteres enthält aber in vielen Fällen keine quantitativen Unsicherheitsangaben zu den einzelnen Emissionsfaktoren, sondern lediglich sogenannte „precision ratings“, denen wiederum grobe Unsicherheitsbereiche zugeordnet sind. Daher wurde es in einigen Fällen als die bessere Option erachtet, Unsicherheiten basierend auf Analogieschlüssen zu Fahrzeugschichten mit vorhandenen Messungen zu schätzen. Wo dies nicht möglich oder angemessen war, wurden die „precision ratings“ verwendet und ihnen Unsicherheitsparameter gem. Tabelle 33 zugeordnet.

Tabelle 33: „Precision rating“ gem. EMEP/EEA und Verwendete Unsicherheitsparameter

Precision rating	Typischer Fehlerbereich (min.)	Typischer Fehlerbereich (max.)	U (UG)	U (OG)	Verteilung
A	10%	30%	30%	30%	normal
B	20%	60%	60%	60%	normal
C	50%	200%	95%	305%	log-normal
D	100%	300%	95%	505%	log-normal
E	„order of magnitude“			Kommt in der vorliegenden Studie nicht vor	

Für die einzelnen Schadstoffe wurde folgendermaßen vorgegangen:

- ▶ **N₂O und NH₃:** Für Pkw und LNF der Stufe Euro 6 liegen Messwerte aus der DBEFA für NH₃ vor; aus diesen konnten Unsicherheiten ermittelt werden. Die restlichen Unsicherheiten wurden aus EMEP/EEA (2019) übernommen. Es wird davon ausgegangen, dass die Unsicherheiten für diejenigen Aggregationsebenen gültig sind, auf welcher die Emissionsfaktoren selbst vorliegen:
 - Für Pkw und LNF sind sie nach Antriebstechnologie, Emissionsklasse und Straßenkategorie differenziert;
 - Die Emissionsfaktoren der schweren Nutzfahrzeuge und Busse sind zusätzlich nach Größenklasse differenziert;
 - Die Emissionsfaktoren der Krafträder sind nach Straßenkategorie, Größenklasse und Antriebstechnologie (v. a. 2- vs. 4-Takt), aber nicht nach Emissionsklasse differenziert.
- ▶ **CH₄ und NMVOC:** Diese beiden Schadstoffe werden im HBEFA mittels ihrer jeweiligen Anteile an den gesamten Kohlenwasserstoffen (HC) berechnet. Die Gesamtunsicherheit ergibt sich daher aus der Unsicherheit der HC-EF und der Unsicherheit der Anteile. Für Pkw

und LNF der Stufe Euro-6 liegen Messwerte aus der DBEFA, aus welchen die Unsicherheiten der Anteile an HC ermittelt werden konnten. Diese Unsicherheiten wurden auch für SNF und KR der gleichen Antriebstechnologie und Emissionsklasse übernommen.

- ▶ **BC:** Black Carbon wird sowohl im HBEFA wie auch gemäß der EMEP/EEA-Methodik mittels seiner gewichtsbezogenen Anteile am PM_{2,5} berechnet. Unsicherheiten der Anteile wurden aus EMEP/EEA (2019) übernommen. Diese liegen wie die Anteile selbst auf Ebene Emissionsklasse vor.
- ▶ **NO₂:** Auch NO₂ wird im HBEFA auf Basis der NO₂-Anteile an den gesamten Stickoxiden (NO_x) berechnet. Die Anteile sind zudem seit HBEFA 4.2 altersabhängig, da sie mit abnehmender Katalysatorleistung ebenfalls abnehmen. Die Gesamtunsicherheit ergibt sich daher aus der Unsicherheit der NO_x-EF, der Unsicherheit der NO₂-Anteile und der Unsicherheit der kumulierten Laufleistungen. Für die NO₂-Anteile wird angenommen, dass die Unsicherheit aus Stichprobe, Messung und Serienstreuung gleich ist wie für NO_x – daher werden die entsprechenden Werte für NO_x übernommen. Die Unsicherheit aus der Berechnung des NO₂/NO_x-Verhältnisses wird anschließend gemäß Gaußscher Fehlerfortpflanzung ermittelt. Die NO₂/NO_x-Verhältnisse liegen auf Ebene Emissionsklasse und Straßenkategorie vor.
- ▶ **SO₂** wird im HBEFA durch die Multiplikation des Kraftstoffverbrauchs mit dem zugehörigen kraftstoffabhängigen SO₂-Emissionsfaktor in g/MJ berechnet. Die Unsicherheit wurde aus (Winter 2018) abgeleitet. Hier wurden insgesamt über 200 Kraftstoffproben analysiert. Aus einer eigenen Auswertung anhand der Werte resultiert eine Unsicherheit für Diesel von ±34 % und für Benzin von ±76 %.

2.3.2.2 Ergebnisse

Die aus dem oben beschriebenen Vorgehen resultierenden Unsicherheiten der Schichtemissionsfaktoren sind im Anhang A.4 in Tabelle 88 bis Tabelle 91 dargestellt.

2.3.3 Schichtemissionsfaktoren Verdunstungsemissionen

Die Schichtemissionsfaktoren der Verdunstungsemissionen wurden, wie die Methodik für die Herleitung der Emissionsfaktoren selbst, aus dem EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2019 (Mellios et al. 2019) übernommen. Sie liegen nur als stark generalisierte „precision indicators“ vor und werden daher für alle drei Verdampfungs-Prozesse (Tankatmung, Warmabstellen, und Verluste während der Fahrt) gleich angenommen. Die resultierenden Unsicherheitsparameter sind in Tabelle 34 dargestellt.

Tabelle 34: Unsicherheiten Verdunstungs-Emissionsfaktoren

Fahrzeugkategorie/ Emissionsklasse	"Precision indicator" EMEP/EEA (2019)	U (UG)	U (OG)	Verteilung
Pkw Euro-0	B	60%	60%	normal
Pkw ab Euro-1	A	30%	30%	normal
LNF (alle)	D	95%	505%	log-normal
KR Euro-0	B	60%	60%	normal
KR ab Euro-1	B	60%	60%	normal

2.4 Unsicherheiten auf Ebene ZSE

2.4.1 Übersicht

Für die Herleitung der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren im ZSE durchlaufen die in den vorangegangenen Inputs für den Straßenverkehr die in Abbildung 7 (S. 50) abgebildeten Berechnungsschritte. Diese wurden für das aktuelle Forschungsprojekt, wie die Berechnungen im HBEFA-Flottenmodell, als Monte Carlo-Simulationen in Python unter Verwendung der „numba“-Bibliothek (Anaconda Inc. 2018) implementiert. Somit kann mit einer hohen Anzahl von Iterationen (hier: 10.000 Iterationen), in denen die Inputwerte gemäß den jeweiligen, aus den vorangegangenen Schritten resultierenden Unsicherheitsparametern variiert werden, die finale Unsicherheit der ZSE-Daten ermittelt werden.

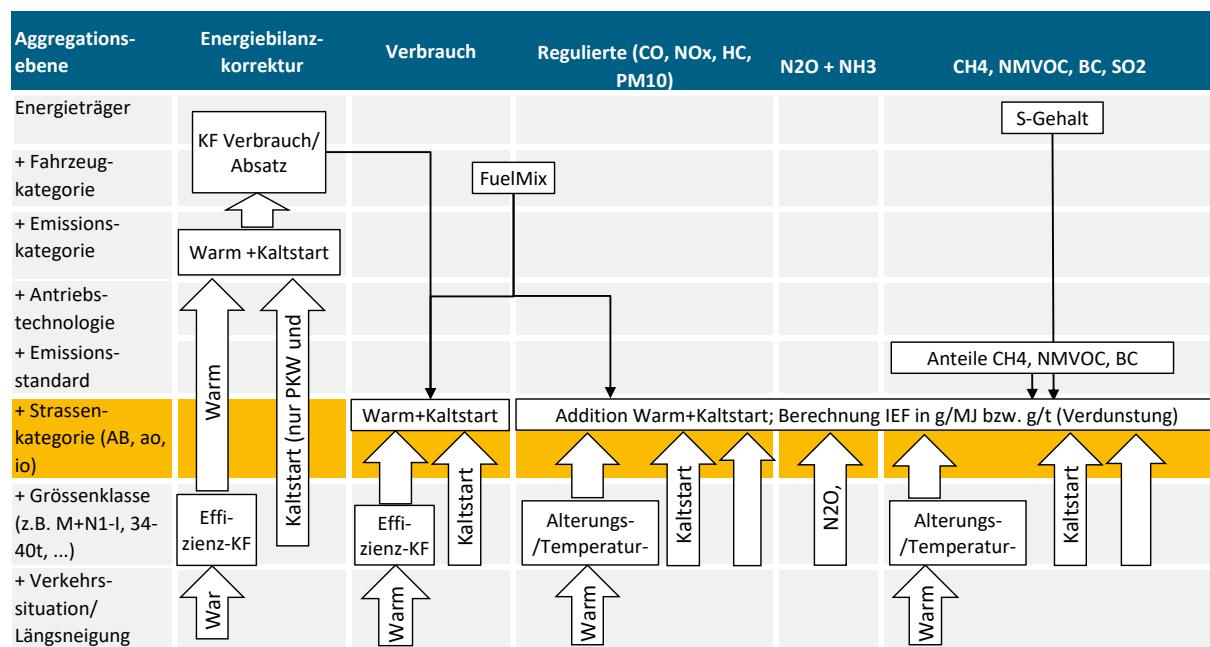
Die als Output erwarteten Verteilungsparameter (Art der Verteilung sowie Ober- und Untergrenze der 95%-Konfidenzintervalle) wurden aus den resultierenden 10.000 Werten pro ZSE-Zeile hergeleitet. Die Histogramme der Verteilungen deuten meist auf eine Normal- oder Log-Normalverteilung hin. Da es aus inhaltlichen Gründen keine negativen Werte geben darf, machen wir die Vorgabe der Log-Normalverteilung und leiten die Verteilungsparameter aus den logarithmierten Werten her. Die visuelle Überprüfung, insbesondere für Verteilungen mit weit entfernten Ausreisern, bestätigt die Angemessenheit dieser Wahl der Verteilungsart. Diejenigen Fälle, die auch als Normalverteilung bezeichnet werden könnten, stellen somit einen Spezialfall der Log-Normalverteilung mit (fast) identischen Absolutwerten der oberen und unteren Grenzen des Konfidenzintervalls dar.

Abbildung 21 zeigt als Übersicht, welche Berechnungsschritte und Aggregationsebenen dabei involviert sind. Die gelb hinterlegten Aggregationsebenen entsprechen dabei den Ziel-Ebenen im ZSE (wobei die Antriebs-Emissionen nach Straßenkategorien unterscheiden, während die Verdunstungsemissionen letztere nicht unterscheiden resp. implizit den Innerorts-Emissionen zuweisen).

Die folgenden Unterkapitel erläutern die entsprechenden Resultate pro Schadstoffgruppe:

- ▶ Kap. 2.4.2.1 und 2.4.2.2 beschreiben die Spalte „Energiebilanzkorrektur“ von Abbildung 21, d. h. die Unsicherheit der Energiebilanz-Korrekturfaktoren;
- ▶ Kap. 2.4.2.3 beschreibt Spalte „Verbrauch“ von Abbildung 21, d. h. Unsicherheit des Kraftstoffverbrauchs (also der Aktivitätsraten in TJ) im ZSE;
- ▶ Kap. 2.4.3.1 beschreibt die Spalte „Regulierte (CO, NO_x, HC, PM₁₀)“ von Abbildung 21, d. h. die Unsicherheit der Emissionsfaktoren der regulierten Schadstoffe im ZSE;
- ▶ Kap. 2.4.3.2 beschreibt die restlichen Spalten von Abbildung 21, d. h. die Unsicherheit der Emissionsfaktoren der nicht-regulierten Schadstoffe im ZSE.

Abbildung 21: Vorgehen bei der Aggregation der Unsicherheiten auf ZSE-Niveau



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS.

2.4.2 Kraftstoffverbrauch

Die Aktivitätsraten im ZSE werden anhand der modellierten Verbräuche und den Kraftstoffabsätzen im Straßenverkehr (siehe Kapitel 2.2.1) bestimmt. Die Methode wird in Abschnitt 2.1.4 erläutert. Für die Ermittlung der Unsicherheiten der Aktivitätsraten in der ZSE-Struktur werden sowohl die Unsicherheiten der modellierten Verbräuche sowie des Kraftstoffabsatzes benötigt, beides auf Ebene Energieträger.

2.4.2.1 Unsicherheit des modellierten Verbrauchs auf Ebene Energieträger/Fahrzeugkategorie

Die Unsicherheit des modellierten Verbrauchs auf Ebene Energieträger/Fahrzeugkategorie, welche als Input für die Berechnung der Unsicherheit der Energiebilanz-Korrekturfaktoren benötigt wird (s. nächstes Kapitel), ist in Tabelle 35 dargestellt.

Sie beträgt je nach Fahrzeugkategorie zwischen ± 6 und ± 13 % für Ottokraftstoffe, zwischen ± 6 und ± 16 % für Dieselkraftstoffe, sowie zwischen ± 10 und ± 30 % für gasförmige Kraftstoffe.

Tabelle 35: Unsicherheiten des modellierten Kraftstoffverbrauchs auf Ebene Energieträger/Fahrzeugkategorie

Fahrzeugkategorie	Energieträger	U _{rel} (UG)	U _{rel} (OG)	Verteilung
Pkw	Ottokraftstoff	-9.7%	9.7%	normal
Pkw	Dieselkraftstoff	-10.1%	10.1%	normal
Pkw	Erdgas	-13.7%	13.7%	normal
Pkw	Strom	-17.5%	17.5%	normal
Pkw	Flüssiggas	-15.5%	15.5%	normal
LNF	Ottokraftstoff	-6.1%	6.1%	normal
LNF	Dieselkraftstoff	-6.7%	6.7%	normal
LNF	Erdgas	-10.8%	10.8%	normal
LNF	Strom	-13.2%	13.2%	normal
RBus	Dieselkraftstoff	-12.8%	12.8%	normal
RBus	Strom	-33.2%	33.2%	normal
LBus	Dieselkraftstoff	-16.1%	16.1%	normal
LBus	Erdgas	-28.1%	28.1%	normal
LBus	Strom	-40.2%	40.2%	normal
KR/MR	Ottokraftstoff	-12.5%	12.5%	normal
KR/MR	Strom	-17.3%	17.3%	normal
KR/MR	Ottokraftstoff (2-Takt)	-11.0%	11.0%	normal
SNF	Dieselkraftstoff	-8.3%	8.3%	normal
SNF	Erdgas	-19.7%	19.7%	normal
SNF	Strom	-17.6%	17.6%	normal

2.4.2.2 Energiebilanzkorrektur

Die über TREMOD ermittelten Kraftstoffverbräuche gehen, wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben, auf den Absatz korrigiert in das ZSE bzw. Inventar ein. Hintergrund dieser Skalierung ist, dass die berechneten Ergebnisse eine hohe Unsicherheit aufweisen, da alle verwendeten Größen wie Fahrleistungen und spezifische Verbräuche mit mehr oder weniger großen Unsicherheiten behaftet sind. Der Absatz wird demgegenüber mit einer relativ hohen Genauigkeit erhoben. So weist bspw. die Gesamtfahrleistung von Pkw eine relative Unsicherheit von ca. 20 % auf (Abschnitt 2.2.2.1) wogegen der Absatz von Benzin nur mit einer Unsicherheit von unter 4 % angegeben wird (Abschnitt 2.2.1).

Bei der Bestimmung der Korrekturfaktoren wird nach der Methodik zunächst der Absatz von Ottokraftstoffen (fossiles Benzin zzgl. Bio-Ethanol) den berechneten Verbräuchen aus TREMOD gegenübergestellt. Der Quotient aus Absatz zu Verbrauch stellt den Korrekturfaktor (EBK) für

Fahrzeuge dar, die mit Ottokraftstoffen betrieben werden. Der Faktor errechnet sich über folgende Gleichung:

Formel 22: Energiebilanzkorrekturfaktor Ottokraftstoff

$$EBK_{Otto} = \frac{Absatz_{Otto}}{\sum_i Verbrauch_i}$$

mit

EBK_{Otto} - Energiebilanzkorrekturfaktor für Ottokraftstoffe

i - alle Fahrzeugkategorien, die mit Ottokraftstoffen betrieben werden

In TREMOD ist ein EBK_{Otto} von 0,87, der für Pkw, KKR, KR und LNF mit Ottomotoren übernommen wird, angegeben.⁸ Da jedoch sowohl der Absatz als auch die Verbräuche der jeweiligen Fahrzeugkategorien Unsicherheiten unterliegen, wird eine Monte-Carlo-Simulation für die Berechnung des EBK_{Otto} durchgeführt. Die folgende Tabelle fasst die Unsicherheiten, die in den oben beschriebenen Analysen ermittelt wurden, zusammen.

Tabelle 36: Unsicherheiten der Eingangsgrößen zur Ermittlung des EBK_{Otto}

Eingangsgröße	TREMOT	U_{rel} (UG)	U_{rel} (OG)	Verteilung
Absatz Benzin ¹	709 PJ	-0,8%	+3,6%	Dreieck
Absatz Bio-Ethanol ¹	30 PJ	-1,1%	+3,5%	Dreieck
Verbrauch Pkw _{Otto} ²	810 PJ	-9,7%	+9,7%	normal
Verbrauch KR _{Otto} ³	21 PJ	-12,5%	+12,5%	normal
Verbrauch LNF _{Otto}	8 PJ	-6,1%	+6,1%	normal

Anmerkungen: Berechnungen der Werte siehe Abschnitt 2.2.1 für den Absatz und Abschnitt 2.4.2.1 für die Verbräuche.

¹Der Absatz von fossilem Benzin und Bio-Ethanol wird für die Berechnung zusammengefasst zum Gesamtbrenzinsabsatz.

²Inkl. übrige leichte Kfz; ihr Anteil am Gesamtverbrauch ist sehr klein (<0,1 %). ³Inkl. KKR.

Aus der Simulation ergibt sich eine relative Unsicherheit des Faktors in Höhe von -6,3 bis +13,1 %. Es wird von einer Dreiecksverteilung ausgegangen.

Es wird in TREMOD angenommen, dass dieser Faktor (sowie seine Unsicherheit) auch für Pkw und LNF mit Dieselmotor gültig sind. Daher weisen diese beiden Fahrzeugkategorien dieselbe Unsicherheit bzgl. ihrer EBK auf.

Für die restlichen mit Diesel betriebenen Fahrzeugkategorien (Busse und SNF) wird ein anderer Faktor verwendet. Dieser errechnet sich aus der Differenz des gesamten Dieselabsatzes (inkl. Biodiesel) und des über den EBK korrigierten Verbrauchs von Diesel-Pkw und -LNF dividiert durch den Verbrauch aller Fahrzeuge mit Dieselmotor. Die Berechnung wird in der folgenden Gleichung dargestellt:

⁸ Das heißt die in Deutschland verkaufte Ottokraftstoffmenge ist niedriger als der in Deutschland verbrauchte Kraftstoff. Gründe könnten der Tanktourismus, falsche Sektorenzuordnung, Modellgenauigkeiten etc. sein.

Formel 23: Energiebilanzkorrekturfaktor Dieselkraftstoff für Busse und SNF

$$EBK_{Diesel, Bus\&SNF} = \frac{Absatz_{Diesel} - EBK_{Otto} \cdot (Verbrauch_{Diesel-Pkw} + Verbrauch_{Diesel-LNF})}{\sum_i Verbrauch_i}$$

mit

$EBK_{Diesel, Bus\&SNF}$ - Energiebilanzkorrekturfaktor für Busse und SNF

i - SNF und Busse, die mit Dieselkraftstoffen betrieben werden

Der Faktor, der sich aus der Berechnung in TREMOD ergibt, beträgt 0,915. Auch in diesem Fall unterliegen die Eingangsgrößen Unsicherheiten. Die folgende Tabelle fasst die Werte zusammen.

Tabelle 37: Unsicherheiten der Eingangsgrößen zur Ermittlung des EBK_{Diesel, Bus&SNF}

Eingangsgröße	Mittelwert	U_{rel} (UG)	U_{rel} (OG)	Verteilung
Absatz Diesel ¹	1.394 PJ	-4,7%	+0,7%	Dreieck
Absatz Biodiesel ¹	97 PJ	-5,5%	+1,1%	Dreieck
EBK _{Otto}	0,87	-6,3%	+13,1%	Dreieck
Verbrauch Pkw _{Diesel}	762 PJ	-10,1%	+10,1%	normal
Verbrauch LNF _{Diesel}	183 PJ	-6,7%	+6,7%	normal
Verbrauch FL- und SRBus _{Diesel}	23 PJ	-12,8%	+12,8%	normal
Verbrauch LBus _{Diesel}	32 PJ	-16,1%	+16,1%	normal
Verbrauch SNF _{Diesel} ²	597 PJ	-8,3%	+8,3%	normal

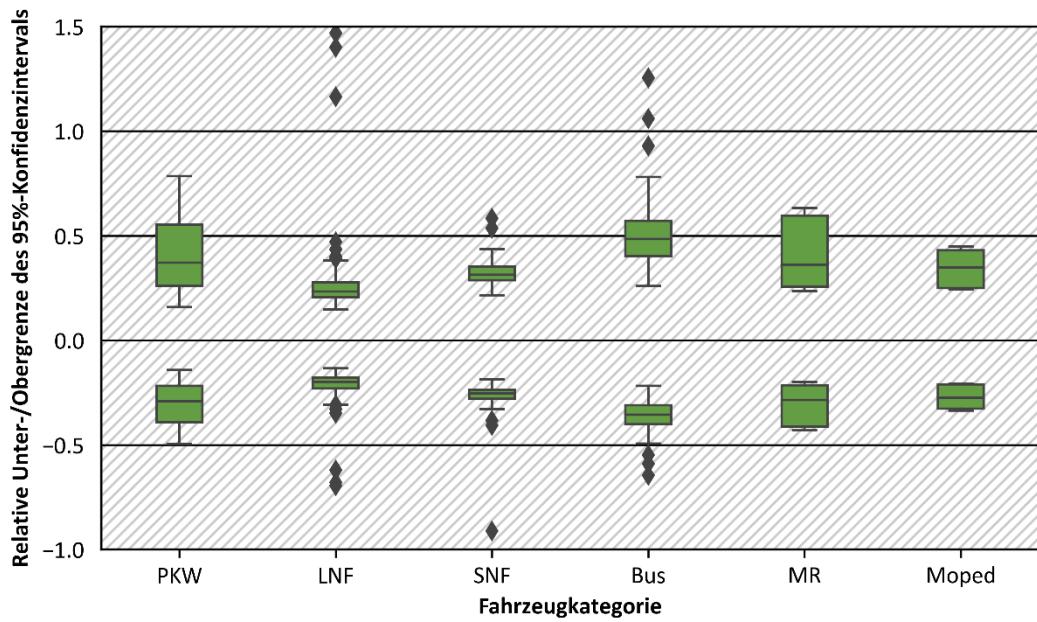
Anmerkungen: Berechnungen der Werte siehe Abschnitt 2.2.1 für den Absatz, Abschnitt 2.4.2.2 für den EBK und Abschnitt 2.4.2.1 für die Verbräuche. ¹Der Absatz von fossilem Diesel und Bio-Diesel wird für die Berechnung zusammengefasst zum Gesamtdieselabsatz. ²Inkl. übrige schwere Kfz; übrige schwere Kfz ihr Anteil am Gesamtverbrauch ist sehr klein (<0,1 %).

Auch für den EBK für Busse und SNF wird eine Monte-Carlo-Analyse durchgeführt. Hieraus resultieren relative Unsicherheit in Höhe von -19,8 bis +20,6 %. Vereinfacht wird hier von einer Normalverteilung mit der relativen Standardabweichung von 10,3 % ausgegangen. Anhand der ermittelten Unsicherheiten für die EBK pro Fahrzeugkategorie können die Unsicherheiten des Kraftstoffverbrauchs im ZSE ermittelt werden.

2.4.2.3 Unsicherheit Kraftstoffverbrauch im ZSE

Die Untergrenzen der Konfidenzintervalle der Kraftstoffverbräuche im ZSE liegen mehrheitlich zwischen -10 und -40 %, die Obergrenzen zwischen +20 und +60 % (Abbildung 22). Der Median der Konfidenzintervalle liegt für die LNF am niedrigsten und die Linienbusse am höchsten; den größten Streubereich weisen Motorräder sowie Personenkraftwagen auf.

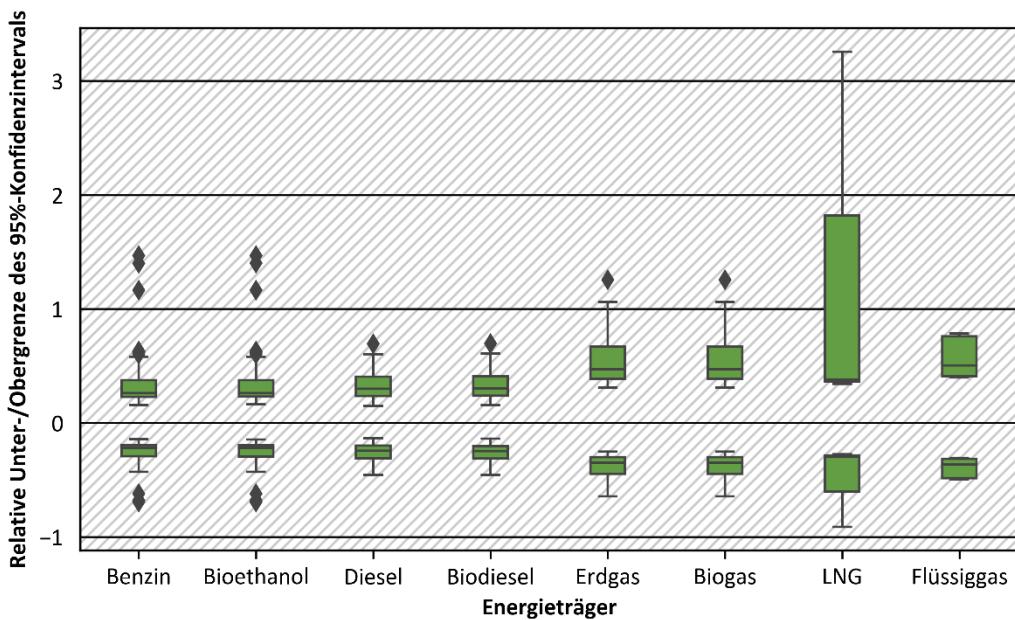
Abbildung 22: Streuung der Unsicherheiten der Kraftstoffverbräuche nach ZSE-Fahrzeugkategorie



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkungen: a) Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeugkategorie dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Fahrzeugkategorie. Die jeweils übereinanderliegenden Boxplots zeigen die Streuung der Unsicherheiten der Obergrenzen (positiver Bereich) und Untergrenzen (negativer Bereich) der 95%-Konfidenzintervalle. b) Ausreißer (Intervallgrenzen unterhalb -100% und oberhalb +150%) sind hier für die bessere Darstellung ausgeblendet.

Die Ausreißer mit hohen Unsicherheiten betreffen v. a. mit alternativen Energieträgern betriebene Fahrzeugschichten: Die höchste Unsicherheit bei den schweren Nutzfahrzeugen mit einem 95-Konfidenzintervall von -91 bis +326 % weisen die mit LNG betriebenen Euro VI (d)-Fahrzeuge auf; bei den leichten Nutzfahrzeugen sind es die mit Bioethanol betriebenen Euro 6 (d)-Fahrzeuge mit einem 95-Konfidenzintervall von -70 bis +147 %. Dies zeigt sich auch in der Darstellung der Streuung der Unsicherheiten nach Energieträger (Abbildung 24).

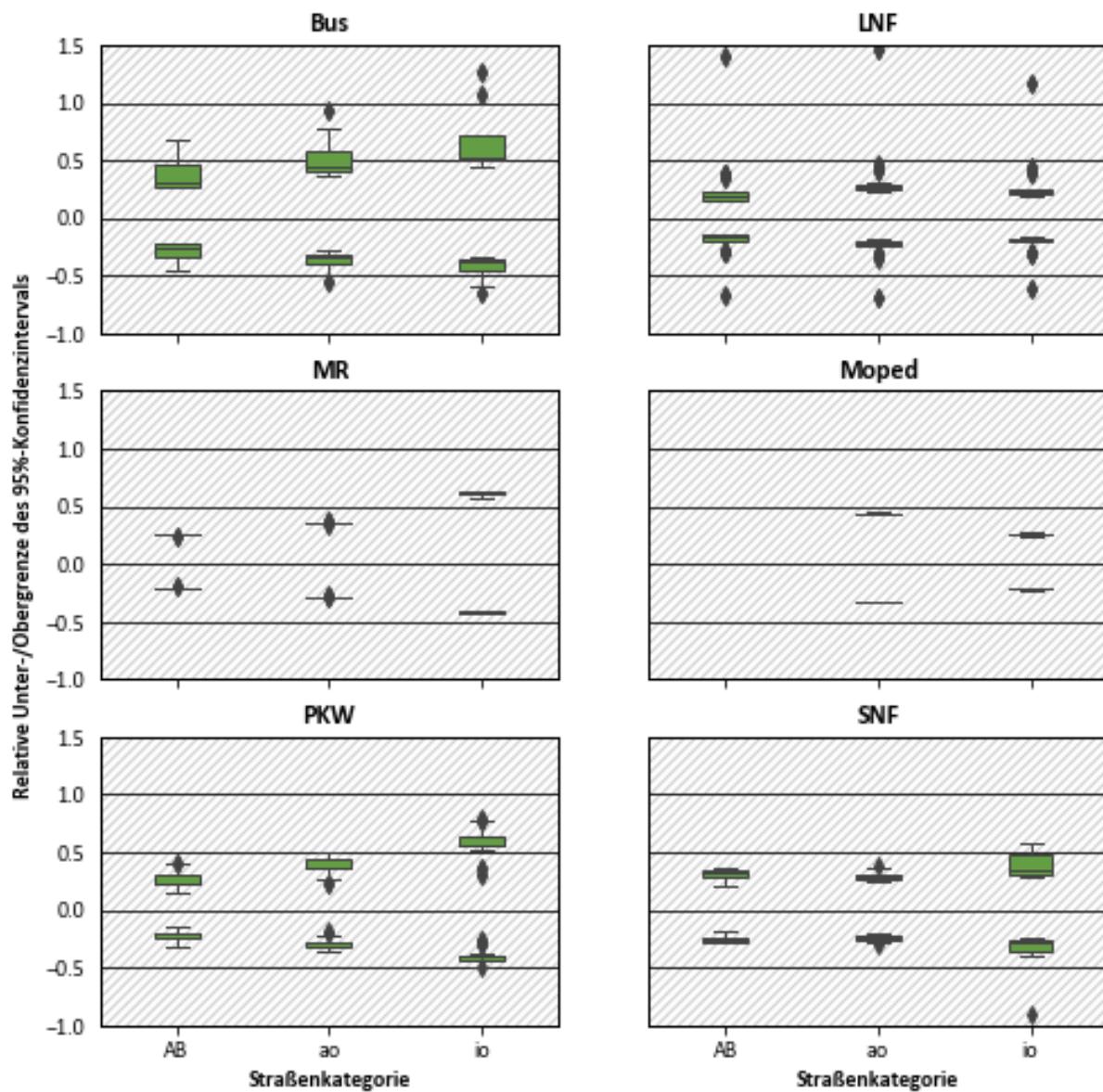
Abbildung 23: Streuung der Unsicherheiten der Kraftstoffverbräuche nach Energieträger



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkung: Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Energieträger dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Energieträger. Die jeweils übereinanderliegenden Boxplots zeigen die Streuung der Unsicherheiten der Obergrenzen (positiver Bereich) und Untergrenzen (negativer Bereich) der 95%-Konfidenzintervalle.

Betrachtet man die Streuung der Konfidenzintervalle differenziert nach Straßenkategorien, so fällt auf, dass die relative Unsicherheit der Kraftstoffverbräuche auf der Autobahn am niedrigsten und innerorts am höchsten ist (Abbildung 24). Dies ist analog der Beobachtung in Abschnitt 2.2.2.2.2.1: Die Input-unsicherheiten für den Autobahnanteil der Fahrleistungen sind niedriger als für die beiden anderen Straßenkategorien. Bei den Mopeds ist zu beachten, dass sie nicht auf der Autobahn verkehren und daher dort auch keine Unsicherheitsbereiche der Kraftstoffverbräuche aufweisen.

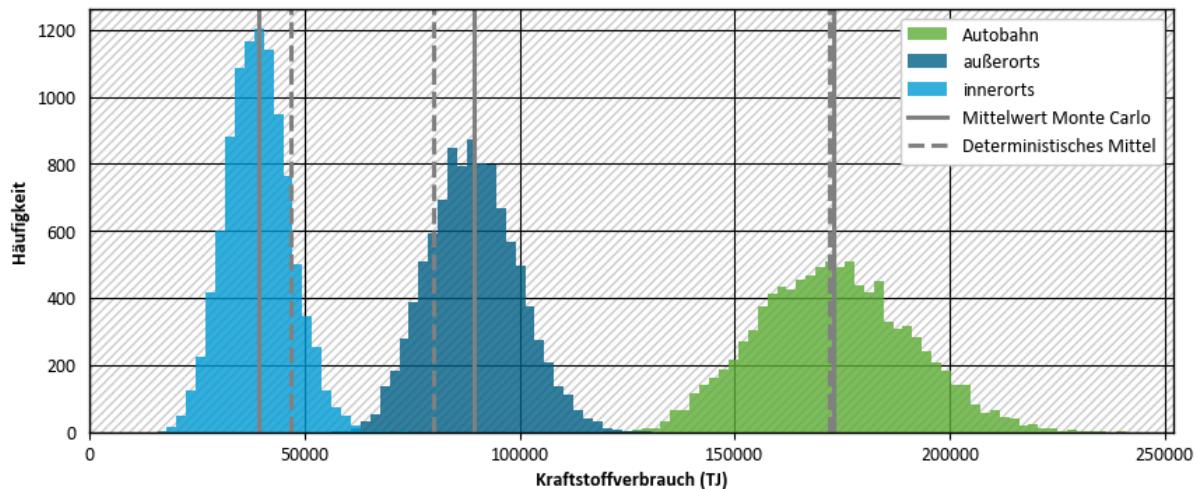
Abbildung 24: Streuung der Unsicherheiten der Kraftstoffverbräuche nach ZSE-Fahrzeug- und Straßenkategorie



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkungen: a) Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeug- und Straßenkategorie dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Fahrzeug- und Straßenkategorie. Die jeweils übereinanderliegenden Boxplots zeigen die Streuung der Unsicherheiten der Obergrenzen (positiver Bereich) und Untergrenzen (negativer Bereich) der 95%-Konfidenzintervalle. b) Ausreißer (Intervallgrenzen unterhalb -100% und oberhalb +150%) sind hier für die bessere Darstellung ausgeblendet.

Wie bereits bei den Ergebnissen der Fahrleistungen (Abschnitt 2.2.2.2.1) lässt sich feststellen, dass die teilweise schiefen oder dreieckförmigen Input-Verteilungen sich durch die Schritte der Emissionsberechnung ausgleichen und symmetrischer werden. Da die Unsicherheiten der Schicht-Emissions- und Verbrauchsfaktoren, die hier mit einfließen, aber insgesamt schiefer sind als diejenigen der Fahrleistungen (siehe Kap. 2.3), werden die Verteilungen trotzdem nicht vollständig symmetrisch. Abbildung 25 zeigt das Beispiel der Verteilungen der aus den Monte-Carlo-Runs resultierenden Zufallswerte der Kraftstoffverbräuche der SNF Euro VI (d) mit Dieselantrieb.

Abbildung 25: Verteilung der Zufallswerte der Kraftstoffverbräuche aus den Monte-Carlo-Simulationen: Beispiel der schweren Nutzfahrzeuge Euro VI (d) mit Dieselantrieb



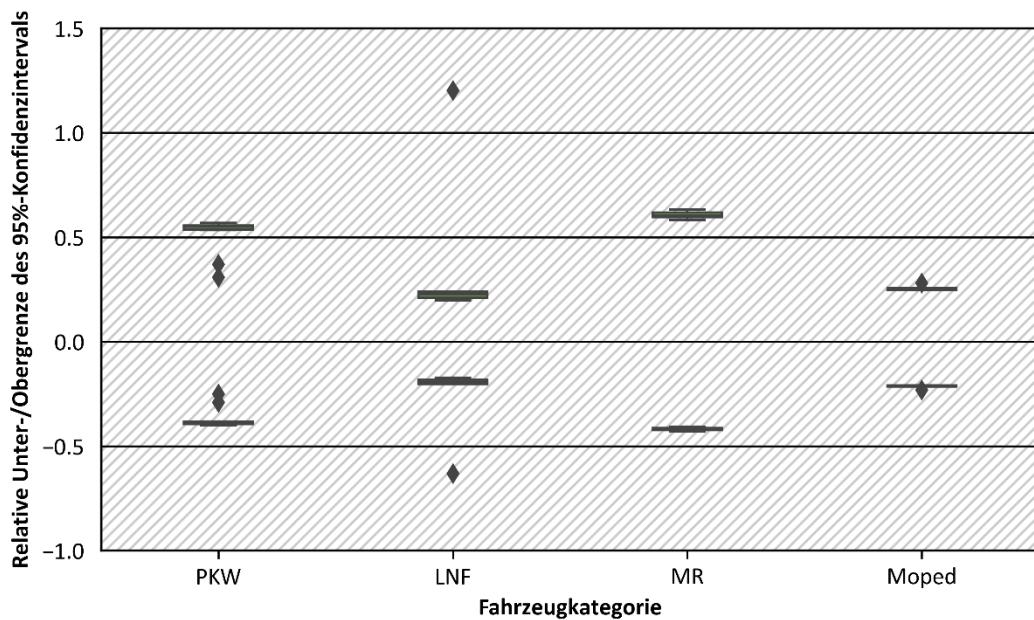
Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkung: Das „deterministische Mittel“ ist der Einzelwert, der ohne Monte-Carlo-Simulation und Berücksichtigung der Unsicherheit resultiert.

2.4.2.4 Unsicherheit Aktivitätsraten Verdunstung im ZSE

Die Aktivitätsraten für die Verdunstung im ZSE entsprechen den innerorts-Verbräuchen an Ottokraftstoff in Tonnen pro Jahr. Die Untergrenzen der entsprechenden Konfidenzintervalle der Aktivitätsraten für die Verdunstung im ZSE liegen mehrheitlich zwischen -18 und -65 %, die Obergrenzen zwischen +20 und 65 % (Abbildung 26). Der Median der 95-Konfidenzintervallgrenzen (Absolutwert) liegt für die LNF am niedrigsten und für die Motorräder am höchsten; den größten Streubereich weisen die LNF auf.

Da die Verdunstung nur aus Ottokraftstoffen relevant ist, sind entsprechende Unsicherheiten für die schweren Nutzfahrzeuge und Busse nicht vorhanden.

Abbildung 26: Streuung der Unsicherheiten der Verdunstung nach ZSE-Fahrzeugkategorie



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkungen: a) Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeugkategorie dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Fahrzeugkategorie. Die jeweils übereinanderliegenden Boxplots zeigen die Streuung der Unsicherheiten der Obergrenzen (positiver Bereich) und Untergrenzen (negativer Bereich) der 95%-Konfidenzintervalle. b) Ausreißer (Intervallgrenzen unterhalb -100% und oberhalb +150%) sind hier für die bessere Darstellung ausgeblendet.

2.4.3 Emissionsfaktoren

2.4.3.1 Regulierte Schadstoffe

2.4.3.1.1 Antriebs-Emissionsfaktoren

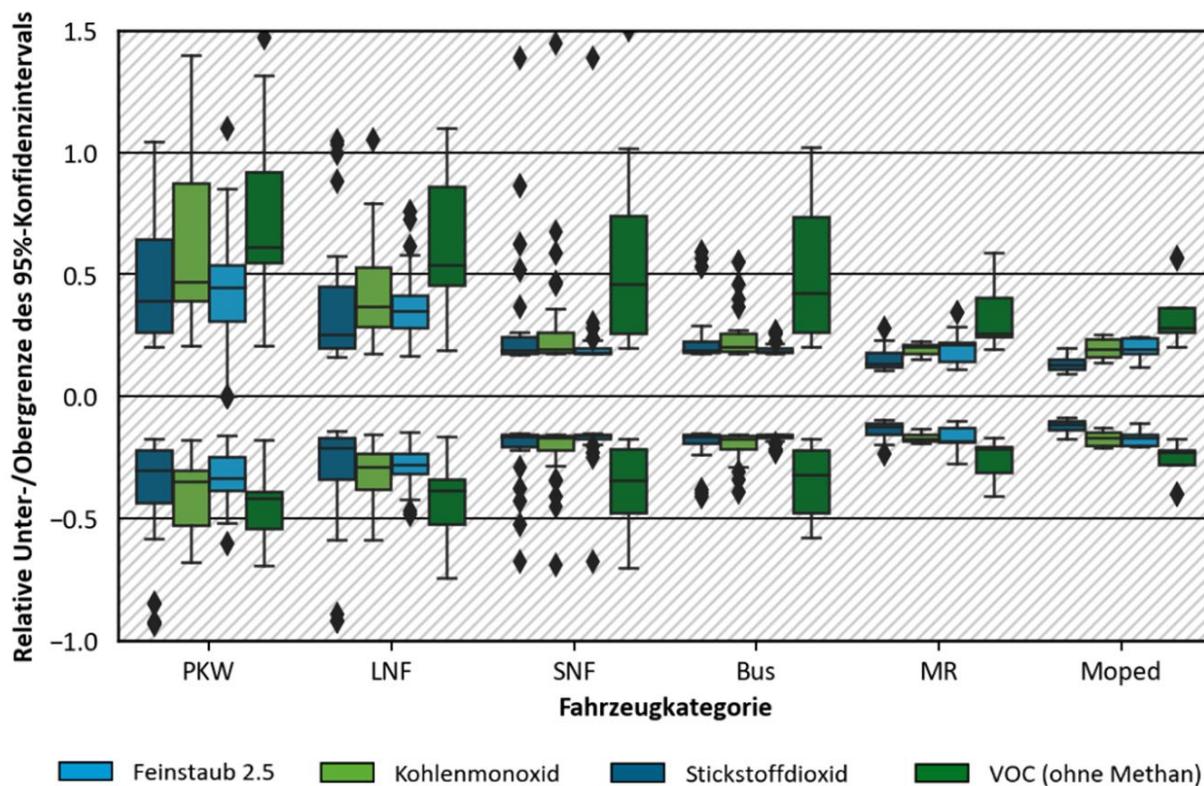
Die Untergrenzen der Konfidenzintervalle der Antriebs-Emissionsfaktoren im ZSE liegen mehrheitlich⁹ zwischen -10 und -55 %, die Obergrenzen zwischen +10 und 90 % (Abbildung 27). Von den regulierten Schadstoffen weist generell das Stickstoffdioxid die geringsten und die NMVOC die höchsten Unsicherheiten auf.

Bei den NMVOC ist teilweise ein weiterer Rechenschritt, der bei den anderen regulierten Schadstoffen entfällt, für die höhere Unsicherheit verantwortlich, nämlich die Auf trennung in Methan und restliche Kohlenwasserstoffe. Strenggenommen wären die gesamten Kohlenwasserstoffe als regulierter Schadstoff zu betrachten – da diese aber im ZSE gar nicht geführt werden, wird hier NMVOC an deren Stelle zu den regulierten Schadstoffen gezählt.

Für Stickstoffdioxid fallen, trotz der insgesamt niedrigeren Unsicherheiten, bei den Pkw und LNF einige Ausreißer nach oben auf. Diese sind der hohen Unsicherheit der Temperaturkorrektur geschuldet, welche bei den Stickoxiden aufgrund der hohen Temperatur-Abhängigkeit der Katalysatorsysteme neuerer Dieselfahrzeuge (ab Euro-5) appliziert werden muss.

⁹ Die Formulierung «mehrheitlich» in diesem Kontext bedeutet, dass die genannte Bandbreite die 25%- und 75%-Perzentile einschließt. Das heißt, es liegen mehr als die Hälfte der 95%-Konfidenz-Intervallgrenzen innerhalb dieser Bandbreite.

Abbildung 27: Streuung der Unsicherheiten der Antriebs-Emissionsfaktoren regulierter Schadstoffe nach Schadstoff und Fahrzeugkategorie



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkungen: a) Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeugkategorie dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Fahrzeugkategorie. Die jeweils übereinanderliegenden Boxplots zeigen die Streuung der Unsicherheiten der Obergrenzen (positiver Bereich) und Untergrenzen (negativer Bereich) der 95%-Konfidenzintervalle. b) Ausreißer (Intervallgrenzen unterhalb -100% und oberhalb +150%) sind hier für die bessere Darstellung ausgeblendet.

Abbildung 28 zeigt die Streuung der Variationskoeffizienten zusätzlich differenziert nach Straßenkategorie. Die bei Fahrleistungen und Kraftstoffverbrauch beobachtete Tendenz zu niedrigerer Unsicherheit auf der Autobahn und höheren Unsicherheiten im Innerortsbereich wird von den hier ebenfalls einfließenden Unsicherheiten der Schichtemissionsfaktoren, den Korrekturfaktoren und, je nach Schadstoff, zusätzlicher Faktoren (wie die Anteile Methan/Nicht-Methan bei den VOC ohne Methan) überlagert.

Dies wird beispielhaft illustriert durch Abbildung 27, welche die Variationskoeffizienten (CV) der Basis-Emissionsfaktoren und Korrekturfaktoren für Stickoxid-Emissionsfaktoren von Diesel-Pkw auf der Autobahn an verschiedenen Stellen in der Berechnungskette zeigt¹⁰. Die erste Spalte zeigt den Wertebereich der Variationskoeffizienten der Schicht-Emissionsfaktoren auf der detailliertesten Ebene (Fahrzeugschicht/Verkehrssituation/Längsneigung, vgl. Abbildung 21). Sie entsprechen den in Kap. 2.3.1.5 gezeigten Resultaten. Durch die Aggregation auf Ebene Fahrzeugschicht/Straßenkategorie (bei der jeweils bis zu mehrere hundert Zeilen auf eine aggregiert werden) wird die Unsicherheit deutlich reduziert, wie die Variationskoeffizienten in

¹⁰ Es werden hier Variationskoeffizienten (CV) anstelle der Ober- und Untergrenzen der 95%-Konfidenzintervalle verwendet, da diese die Unsicherheit in jeweils einem anstatt zwei Werten ausdrücken (bei symmetrischen Verteilungen entspricht der Variationskoeffizient der Hälfte der relativen Ober-/Untergrenze des 95%-Konfidenzintervalls).

der zweiten Spalte zeigen. Anschließend werden die Korrekturfaktoren für Laufleistungen und Temperatur berücksichtigt: Diese fließen auf Ebene Fahrzeugschicht/Straßenkategorie ein und weisen – siehe dritte und vierte Spalte von Abbildung 28 – eine deutlich höhere Unsicherheit als die auf dieselbe Ebene aggregierten, noch unkorrigierten Emissionsfaktoren auf, v. a. bei den jüngeren Emissionsklassen. Die Unsicherheit der korrigierten Emissionsfaktoren in der letzten Spalte reflektiert denn auch die Unsicherheit der applizierten Korrekturfaktoren. Die letzte Spalte entspricht noch nicht der Unsicherheit im ZSE: In diese fließt zusätzlich noch die Konversion der Emissionsfaktoren von g/km nach g/MJ durch Division durch den Kraftstoffverbrauch ein (siehe Abbildung 21). Das Beispiel zeigt jedoch, wie die Unsicherheiten der Inputs auf der detailliertesten Ebene durch Aggregation verringert werden und die finale Unsicherheit dominiert wird durch Faktoren, die auf Aggregationsebenen nahe der Ziel-Ebene einfließen.

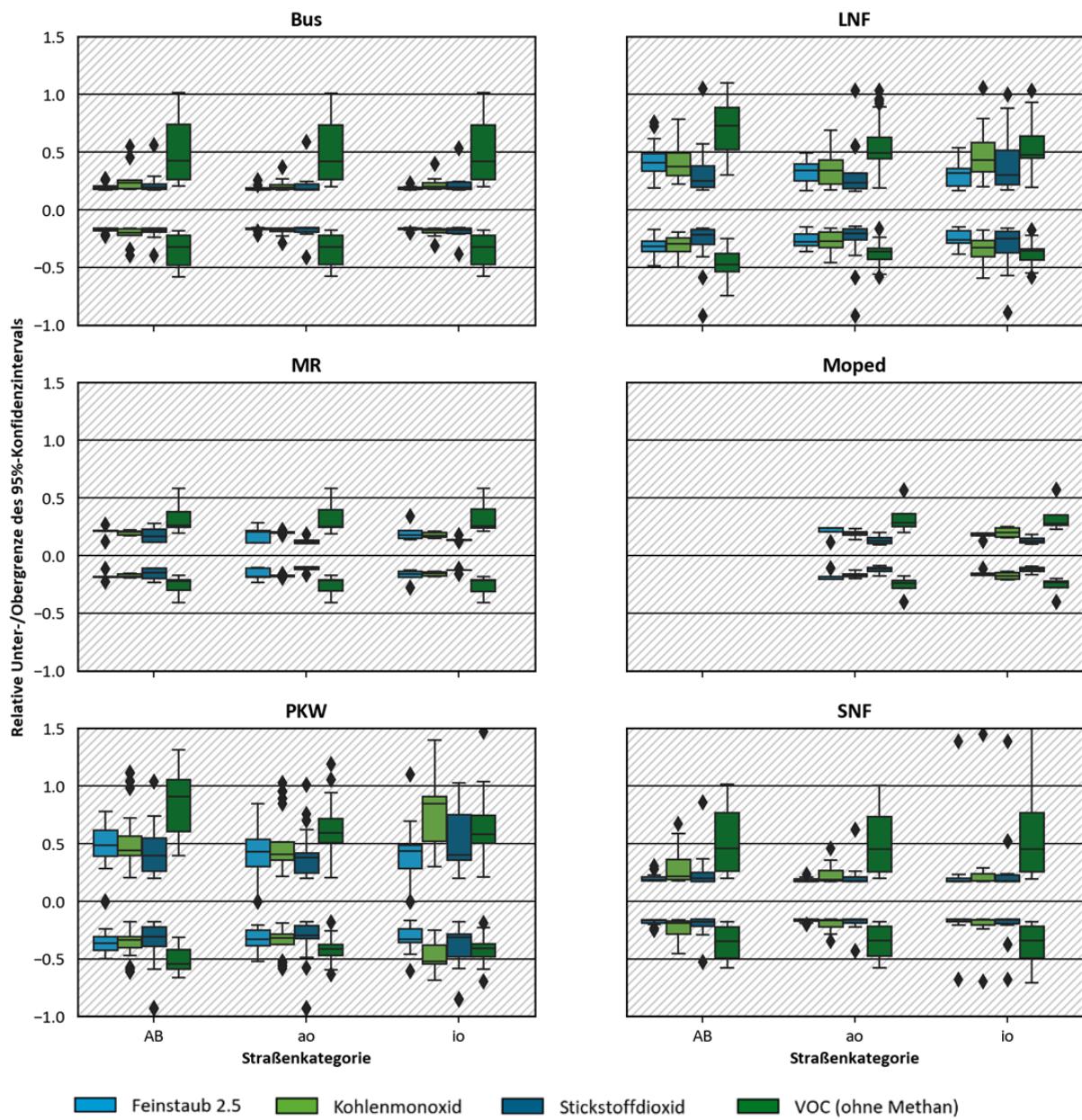
Abbildung 29 visualisiert schließlich die finalen ZSE-unsicherheiten der im Beispiel verwendeten Diesel-Pkw nach Emissionsklasse; hier zeigt sich die mit jüngeren Emissionsklassen stark zunehmende Unsicherheit. Diese sind die Folge des Zusammenspiels noch wenig verfügbarer Messdaten für die jüngeren Fahrzeugschichten, was in einer hohen Stichprobenunsicherheit resultiert (siehe auch Kap. 2.3.1.5), sowie der Applikation von Korrekturfaktoren mit hoher Unsicherheit.

Tabelle 38: Variationskoeffizienten (CV) der Basis-Emissionsfaktoren und Korrekturfaktoren für Stickoxid-Emissionen von Diesel-Pkw auf der Autobahn

ZSE-Kategorie	Schicht-EF Ebene Fz.-Schicht, Verkehrssit., Längsneigung	EF Ebene Fz.-Schicht, Straßenkategorie, vor Korrekturen	Laufleistungs-korrektur	Temperatur-korrektur	EF Ebene Fz.-Schicht, Straßenkategorie, nach Korrekturen
SV Pkw DK Euro 1/I AB	11% - 18%	4%	11%	0%	11%
SV Pkw DK Euro 2/II AB	12% - 18%	4%	11%	0%	11%
SV Pkw DK Euro 3/III AB	12% - 18%	5%	17%	13%	17%
SV Pkw DK Euro 4/IV AB	12% - 18%	4%	28%	25%	30%
SV Pkw DK Euro 5/V AB	28% - 45%	11%	28%	26%	24%
SV Pkw DK Euro 6/VI (ab) AB	29% - 45%	11%	24%	23%	23%
SV Pkw DK Euro 6/VI (c) AB	29% - 45%	10%	38%	36%	35%
SV Pkw DK Euro 6/VI (d) AB	42% - 106%	17%	172%	174%	204%
SV Pkw DK Euro 6/VI (d-TEMP) AB	42% - 80%	17%	129%	127%	175%

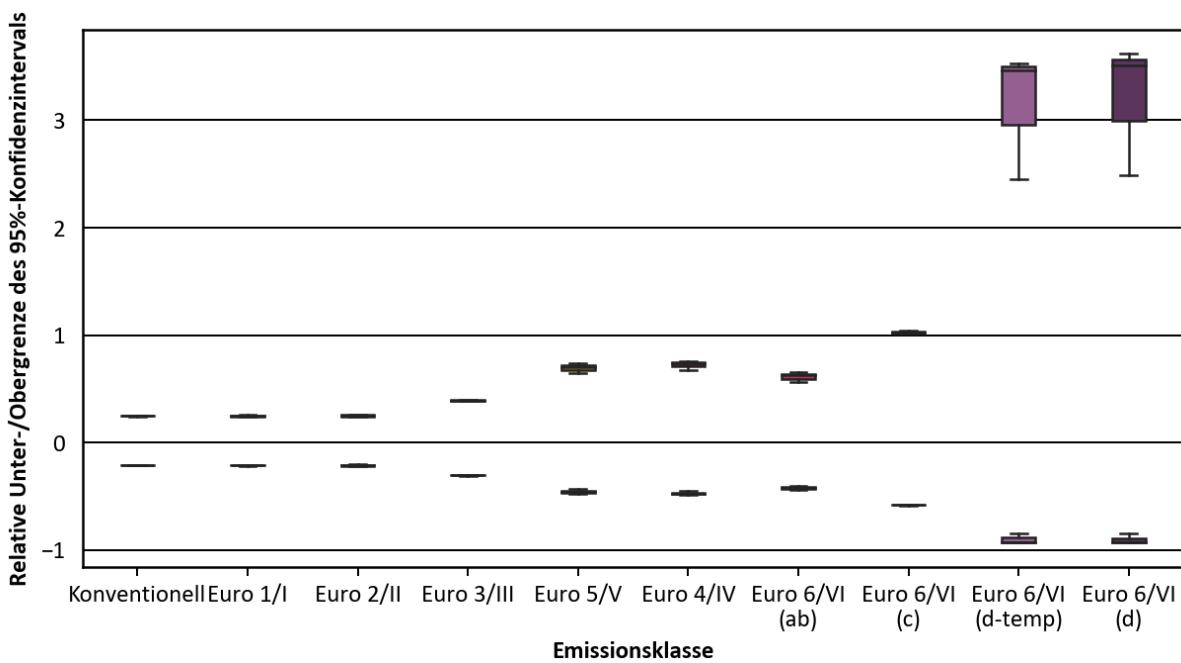
Anmerkung: Hier werden Variationskoeffizienten (CV) anstelle Ober- und Untergrenzen der 95%-Konfidenzintervalle gezeigt, da diese die Unsicherheit in jeweils einer Zahl ausdrücken. Bei symmetrischen Verteilungen entspricht der Variationskoeffizient der Hälfte der relativen Ober-/Untergrenze des 95%-Konfidenzintervalls.

Abbildung 28: Streuung der Unsicherheiten der Antriebs-Emissionsfaktoren regulierter Schadstoffe nach Schadstoff, Fahrzeug- und Straßenkategorie



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkungen: a) Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeug- und Straßenkategorie dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Fahrzeug- und Straßenkategorie. Die jeweils übereinanderliegenden Boxplots zeigen die Streuung der Unsicherheiten der Obergrenzen (positiver Bereich) und Untergrenzen (negativer Bereich) der 95%-Konfidenzintervalle. b) Ausreißer (Intervallgrenzen unterhalb -100% und oberhalb +150%) sind hier für die bessere Darstellung ausgebündet.

Abbildung 29: Streuung der Unsicherheit der NO_x-Emissionsfaktoren von Diesel-Pkw nach Emissionsklasse

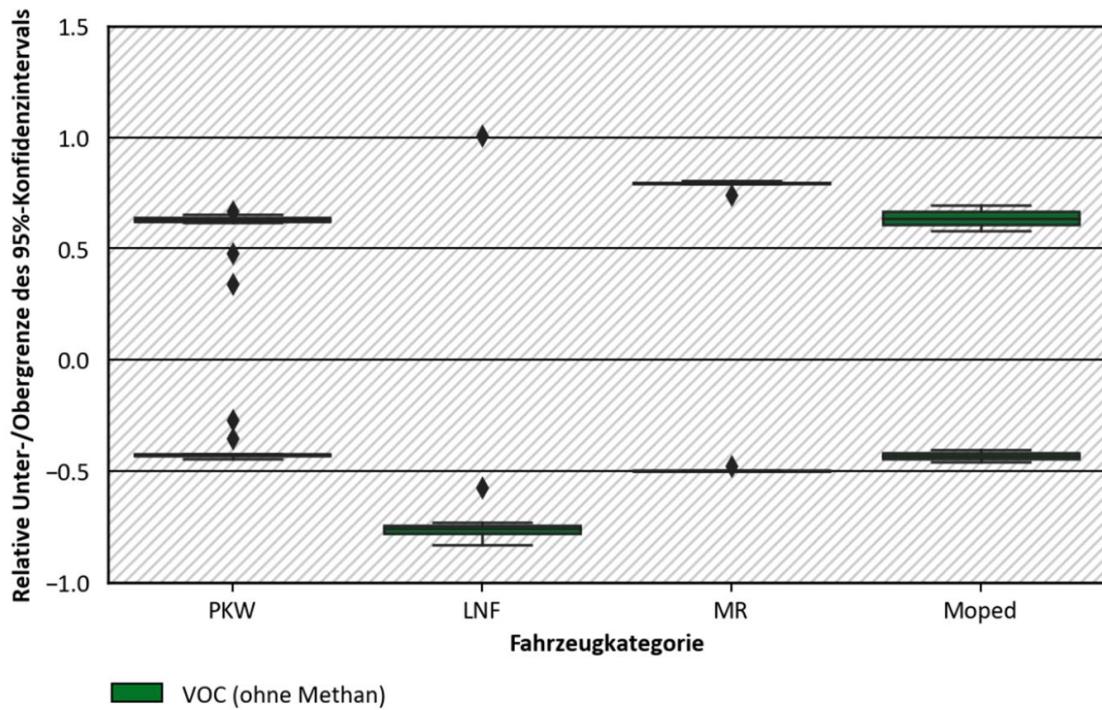


Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkung: Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Emissionsklasse dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Emissionsklasse. Die jeweils übereinanderliegenden Boxplots zeigen die Streuungen der Unsicherheiten der Obergrenzen (positiver Bereich) und Untergrenzen (negativer Bereich) der 95%-Konfidenzintervalle.

2.4.3.1.2 Verdunstungs-Emissionsfaktoren

Verdunstungs-Emissionsfaktoren liegen nur für NMVOC aus Otto-Antrieben vor. Die Untergrenzen der Konfidenzintervalle der entsprechenden Emissionsfaktoren im ZSE liegen mehrheitlich zwischen -45 und -80 %, die Obergrenzen zwischen +60 und +200 % (Abbildung 27). Die hohe finale Unsicherheit im ZSE ist der hohen Input-Unsicherheit der Schichtemissionsfaktoren geschuldet, welche als stark generalisierte „precision indicators“ aus dem EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2019 (Mellios et al. 2019) übernommen wurden (siehe Kap. 2.3.3).

Abbildung 30: Streuung der Unsicherheiten der Verdunstungs-Emissionsfaktoren der VOC (ohne Methan) nach Fahrzeugkategorie



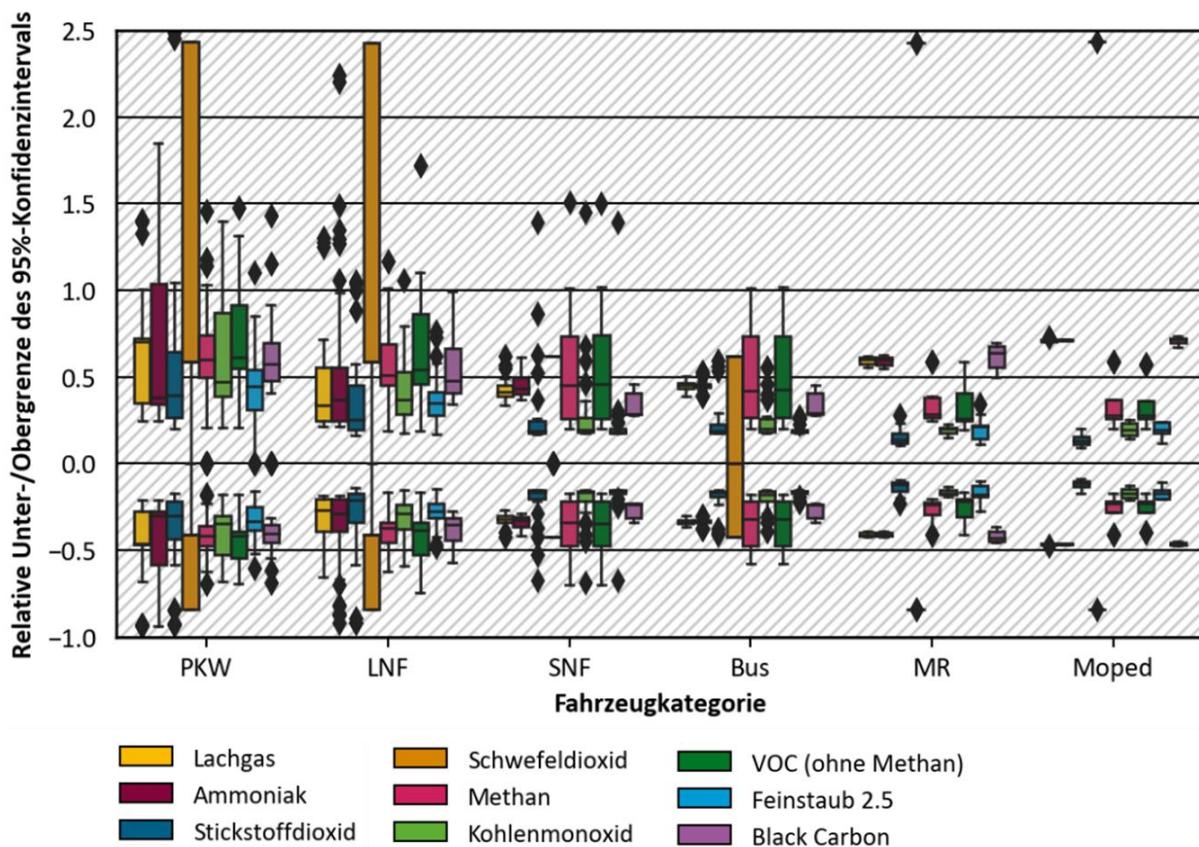
Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkung: a) Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeugkategorie dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Fahrzeugkategorie. Die jeweils übereinanderliegenden Boxplots zeigen die Streuung der Unsicherheiten der Obergrenzen (positiver Bereich) und Untergrenzen (negativer Bereich) der 95%-Konfidenzintervalle. b) Ausreißer (Intervallgrenzen unterhalb -100% und oberhalb +150%) sind hier für die bessere Darstellung ausgeblendet.

2.4.3.2 Nicht-regulierte Schadstoffe

Die Untergrenzen der Konfidenzintervalle der Antriebs-Emissionsfaktoren im ZSE liegen mehrheitlich zwischen -25 und -85 %, die Obergrenzen zwischen +30 und +245 % (Abbildung 27).

Im Fall der Schadstoffe Ammoniak und Lachgas liegen nur wenige Rechenschritte zwischen den Input-Untersicherheiten der Schichtemissionsfaktoren und den ZSE-Untersicherheiten, da erstere fast auf der Aggregationsebene des ZSE vorliegen und keine Korrekturfaktoren appliziert werden (vgl. auch Abbildung 21). Im Falle von Methan und Black Carbon gehen die Untersicherheiten im ZSE auf die Untersicherheiten der regulierten Ausgangsschadstoffe HC (Kohlenwasserstoffe, d.h. Methan + NMVOC, als Summe im ZSE nicht ausgewiesen) und PM_{2.5} zurück, sowie auf die Faktoren, mittels derer sie von aus ihnen hergeleitet werden (Kap. 2.3.2 resp. Tabelle 90 und Tabelle 91 in Anhang A.4). Die Untersicherheiten der letzteren liegen im Fall von Methan höher als von Black Carbon. Im Fall des Schwefeldioxids schließlich sind die Untersicherheiten rein von der Untersicherheit der Schwefelgehalte im verwendeten Kraftstoff abhängig, welche beim Ottokraftstoff und Gas am höchsten liegen (siehe Kap. 2.3.2 resp. Tabelle 92 in Anhang A.4).

Abbildung 31: Streuung der Unsicherheiten der Antriebs-Emissionsfaktoren nicht-regulierter Schadstoffe nach Schadstoff und Fahrzeugkategorie



Quelle: Eigene Darstellung, INFRAS. Anmerkungen: a) Die Abbildung stellt die Streuungen der relativen Konfidenzintervallgrenzen pro Fahrzeugkategorie dar (Wert 1.0 = 100%). Jede Kombination von Fahrzeugschicht (Subsegment) und Straßenkategorie liefert einen Einzelwert; die Boxplots zeigen die Streuung der Einzelwerte pro Fahrzeugkategorie. Die jeweils übereinanderliegenden Boxplots zeigen die Streuungen der Unsicherheiten der Obergrenzen (positiver Bereich) und Untergrenzen (negativer Bereich) der 95%-Konfidenzintervalle. b) Ausreißer (Intervallgrenzen unterhalb -100% und oberhalb +250%) sind hier für die bessere Darstellung ausgeblendet.

3 Flugverkehr

3.1 Übersicht Methodik

Die Quellgruppe 1.A.3.a Ziviler Luftverkehr umfasst den nationalen gewerblichen und nicht gewerblichen Flugverkehr innerhalb Deutschlands ohne Militär. In TREMOD-AV wird sowohl der nationale als auch der von Deutschland abgehende internationale Flugverkehr erfasst. Berücksichtigt wird hierbei – abweichend von dem sonst in TREMOD verwendeten Territorialprinzip – auch die Flugstrecke außerhalb des deutschen Territoriums bis zur ersten (Zwischen-)Landung. Grundlage für die Verkehrsaktivitäten sind Verkehrsleistungsdaten von Destatis, die in einer Sonderauswertung jährlich zur Verfügung gestellt werden (in aggregierter Form gegeben in (Destatis 2021, S. 1)). Hierbei werden für den nationalen und internationalen Flugverkehr u. a. die Anzahl der Starts differenziert nach Distanzklassen (z. B. 301-400 km) und nach Flugzeugtypen (z. B. Airbus A320) übermittelt.

Der Energieverbrauch und die Emissionen werden über die genannten Verkehrsleistungsdaten und (überwiegend) den Emissionsfaktoren aus (EEA 2019) berechnet. Hier werden sowohl für den Verbrauch als auch für die Freisetzung von HC, NO_x, PM und CO die Werte für den LTO-Zyklus (in kg/Start) und dem CCD-Zyklus (in kg/km) pro Flugzeugtyp gegeben. Innerhalb von TREMOD-AV wird der LTO-Zyklus weiter differenziert in die LTO-Phase (ohne Taxi), der den Start, Steigflug und Anflug beinhaltet, sowie die Taxi-Phase.

Die Schadstoffemissionen NH₃, NO₂, SO_x, NMVOC und die Treibhausgase CH₄ und N₂O werden in Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauchs (z. B. SO₂ in kg/kg_{Kraftstoff}) oder der Emissionen (z. B. NMVOC in kg/kg_{HC}) ermittelt.

Als Ergebnis erhält man in TREMOD sowohl den gesamten Kraftstoffverbrauch als auch die gesamten THG- und Schadstoffemissionen differenziert nach Kraftstoffart (Kerosin, Flugbenzin), Zyklus (LTO, CCD) und Zielflughafen (national, international). Die THG- und Schadstoffemissionen werden nach der genannten Differenzierung auf den jeweiligen Energieverbrauch bezogen, sodass man Emissionsfaktoren in kg/TJ erhält. Neben der Quellgruppe 1.A.3.a werden so auch die spezifischen Emissionen des internationalen Verkehrs (Quellgruppe 1.D.1.a) angegeben.

Neben den spezifischen Emissionsfaktoren werden im ZSE zudem die gesamten Energiemengen pro Kraftstoffart und Zyklus berichtet. Hierfür werden jedoch nicht unmittelbar die in TREMOD ermittelten Kraftstoffverbräuche verwendet. Wie auch beim Straßenverkehr wird die Gesamtenergiemenge des zivilen Luftverkehrs (Quellgruppen 1.A.3.a und 1.D.1.a) auf den Energieabsatz in Deutschland bezogen. Beim Flugverkehr erfolgt die Aufteilung des Kraftstoffverbrauchs (KV) im ZSE wie folgt:

- ▶ KV_{LTO, national}: direkte Verwendung der TREMOD-Verbrauchsberechnung
- ▶ KV_{CCD, national}: direkte Verwendung der TREMOD-Verbrauchsberechnung
- ▶ KV_{LTO, international}: direkte Verwendung der TREMOD-Verbrauchsberechnung
- ▶ KV_{CCD, international} = Absatz - KV_{LTO, international} - KV_{CCD, national} - KV_{LTO, national}

Das heißt, dass die gesamten Energiemengen des nationalen Flugverkehrs (1.A.3.a) direkt aus TREMOD genommen werden und die Energiemengen, die dem internationalen Flugverkehr (1.D.1.a) zugeteilt werden, der Differenz aus Energieabsatz und Verbrauch nationaler Flüge entsprechen. Allgemein lässt sich sagen, dass die verwendete Methode zwar eine Aufteilung des

Absatzes auf den nationalen und internationalen Flugverkehr ermöglicht, aber es können hierbei durchaus auch Fehler entstehen. Diese sind jedoch nur schwer quantifizierbar und werden daher hier nicht weiter analysiert. Demgegenüber werden jedoch die Unsicherheiten bei Verwendung der Methode ermittelt.

Beim Flugbenzin werden die prozentualen Verbrauchsanteile (Differenziert nach Zielflughafen und Flugphase), die über TREMOD berechnet werden, verwendet, um den Benzinabsatz aufzuteilen. Die o. g. Gleichung wird hier nicht verwendet.

3.2 Eingangs-Aktivitätsraten

3.2.1 Primäre Aktivitätsraten – Kraftstoffabsatz

Die Summe der Aktivitätsraten der Quellgruppen 1.A.3.a und 1.D.1.a des Treibhausgasinventars entspricht dem in den Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland dokumentierten Endenergieverbrauch des Sektors „Zivile Luftfahrt“. Üblicherweise wird der Wert in Masseeinheiten (z. B. Tonnen bei flüssigen Kraftstoffen) oder Terajoule (TJ) angegeben. Die Gesamtmengen für die Emissionsberichterstattung werden den Mineralölstatistiken des BAFA, die auf Angaben des Mineralölwirtschaftsverbands (en2x – Wirtschaftsverband Fuels und Energie) zurückgehen, entnommen.

Sie werden in ZSE aufgeteilt in die Strukturelemente und damit je Energieträger unterteilt nach Flugphase (LTO, CCD) und Zielflughafen (national, international).

Bei der Ableitung der Aktivitätsraten müssen demnach Bottom-up- und Top-down-Berechnungen kombiniert werden. Dabei sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- ▶ Mit TREMOD werden Energieverbrauch und Emissionen für den gewerblichen und nicht-gewerblichen Flugverkehr (ohne Militär) von in Deutschland startenden Flugzeugen bis zur ersten (Zwischen-)Landung berechnet.
- ▶ Die Energiebilanz weist den inländischen Kraftstoffabsatz aus.

Die Differenz zwischen den mit TREMOD bottom-up berechneten Verbräuchen und den Absatzzahlen nach Energiebilanz wird durch Anpassungsfaktoren ausgeglichen. Diese Korrekturfaktoren berücksichtigen u. a. durch folgende Einflussfaktoren verursachte Differenzen:

1. Allgemeine Unterschiede in der Bilanzierung:
 - räumliche Differenzen: Betankungsort und Verbrauchsort unterscheidet sich
 - zeitliche Differenzen zwischen Betankung und Verbrauch (Jahreswechsel)
2. Unsicherheiten bei der Erfassung der Kraftstoffabsätze für den Flugverkehr:
 - Unterschiede in den Heizwerten der Kraftstoffe
 - Unvollständige Erhebung der Absatzmenge
 - Messungenauigkeiten
 - Zuordnungsdifferenzen der Energiebilanz (Militär)
3. Unsicherheiten des Emissionsmodells:
 - Ermittlung der Starts, Flug-km und Taxi-Zeiten pro Flugzeugtyp

- spezifischer Energieverbrauch und Emissionen der Flugzeugtypen
- Einfluss Umgebungsbedingungen

Unter Punkt 1 sind Aspekte aufgeführt, die einen Unterschied zwischen der Verbrauchsberechnung und dem Kraftstoffabsatz erklären können. Bezuglich des ZSE sind jedoch aufgrund der Methodik beide Punkte für die primären Aktivitätsraten nicht von hoher Relevanz. Maßgeblich für die berichteten Emissionen eines Landes sind die Kraftstoffabsätze innerhalb eines Jahres. Diese müssen jedoch nicht zwangsläufig den realen Verbräuchen eines Landes in diesem Jahr entsprechen:

Räumliche Differenzen

Flughäfen weisen – obwohl der Kraftstoff länderübergreifend steuerbefreit ist – unterschiedliche Kraftstoffpreise auf. So kann es für eine Fluglinie bspw. wirtschaftlich sinnvoll sein, mehr Kraftstoff am Startflughafen zu tanken, um bei einer Zwischenlandung einen Tankvorgang auszusparen, sofern der Flughafen auf dem ein Zwischenstopp eingelegt wird, hohe Kraftstoffpreise hat. Dieser Aspekt ist aufgrund der Methodik im ZSE nicht relevant, denn in TREMOD wird der im ZSE berichtete nationale Kerosinverbrauch direkt aus der TREMOD-Berechnung verwendet. Bei nationalen Flügen hat die räumliche Differenz i. d. R. keine Auswirkung, da sowohl der Verbrauch als auch der Absatz des Kraftstoffs komplett in Deutschland stattfindet. Beim Flugbenzin können durchaus Unsicherheiten entstehen, da hier eine andere Methode verwendet wird (siehe Abschnitt 3.1), allerdings ist zum einen der geschätzte Anteil von internationalen Flügen bei Flugbenzin sehr gering und zum anderen ist der gesamte Flugbenzinverbrauch verglichen mit Kerosin vernachlässigbar gering, sodass die Unsicherheit aufgrund der räumlichen Differenz beim Flugbenzinverbrauch vernachlässigt wird.

Zeitliche Differenzen

Wie beim Straßenverkehr können auch beim Flugverkehr zeitliche Differenzen entstehen, die jedoch ebenfalls keinen Einfluss auf die Unsicherheiten der berichteten primären Aktivitätsraten (Kraftstoffabsätze) hat. Die zeitlichen Differenzen könnten einen Einfluss auf die Aufteilung des Kraftstoffabsatzes auf nationale bzw. internationale Flüge haben, aber die Auswirkungen werden als vernachlässigbar bewertet.

Die unter Punkt 2 aufgeführten Unsicherheiten betreffen im Wesentlichen die primären Aktivitätsraten. Zur Bestimmung dieser Unsicherheiten werden die einzelnen Ursachen separat untersucht.

Heizwerte

Bei Kerosin und Flugbenzin gibt es ebenso wie bei Otto- und Diesalkraftstoffen zum einen natürliche Schwankungen in ihrer chemischen Zusammensetzung. Zum anderen werden auch verschiedene Sorten (z. B. Jet A-1, Jet B) verwendet, die sich zum Beispiel in ihrem Gefrierpunkt unterscheiden. Demnach variiert auch der Heizwert. Einen Einfluss auf das Ergebnis hat der Heizwert, da zum einen die Aufteilung des Absatzes auf Zielflughafen und Flugphase in TREMOD anhand der Energieverbräuche erfolgt, aber sowohl der Absatz als auch die spezifischen Verbräuche z. T. in Massen- und teilweise in Energieeinheiten gegeben sind. Zum anderen werden die Emissionsfaktoren in der ZSE-Struktur energiespezifisch in kg/TJ gegeben.

Um die Bandbreite zu ermitteln werden Heizwerte aus (Lawicki 2002) gegenübergestellt. Tabelle 39 stellt die Werte für Kerosin und Flugbenzin dar.

Tabelle 39: Heizwertbandbreite von Kerosin und Flugbenzin

Heizwerte in MJ/kg

	Kerosin	Flugbenzin
Min	42,80	44,00
Typisch	43,20	44,18
Max	43,45	44,52
TREMOD	42,80	43,54

Quelle: Min, Typisch und Max aus (Lawicki 2002).

Verglichen mit der Quelle sind die Heizwerte mit TREMOD gering angenommen. Im Fall von Kerosin entspricht es genau dem gegebenen Minimalwert und bei Flugbenzin ist der Wert aus TREMOD niedriger als die angegebene Bandbreite. Es wird für die folgenden Analysen vereinfacht eine Dreiecksverteilung angenommen. Hierbei stellt der TREMOD-Wert das Minimum dar und der Maximalwert aus der Quelle entspricht dem Maximum. Der typische Wert aus (Lawicki 2002) wird als wahrscheinlichster Wert definiert.

Unvollständige Erhebung

Das BAFA erhebt nach Mineralöldatengesetz den Gesamtabsatz von Erdölproduktions. Da rund 98 % der Erhebungsdaten – also auch der Inlandsabsätze – explizit von den Unternehmen gemeldet werden, geht das BAFA von geringen Unsicherheiten im Gesamtabsatz aus.

Inlandsabsätze von kleinen Unternehmen gehen über den Außenhandel als Differenz aus Import und Export in die Statistik ein. (BAFA 2021)

Aufgrund der Angaben des BAFA wird davon ausgegangen, dass die Standardabweichung für die Erhebung bei 0,51 % (Normalverteilung) liegt. Die Herleitung ist analog zum Straßenverkehr (siehe Abschnitt 2.2.1).

Messungenauigkeiten

Bei der berichteten Kraftstoffmasse können Abweichungen durch Messungenauigkeiten entstehen. Da Erdölprodukte monetär hochwertige Stoffe sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Messinstrumente eine hohe Messgenauigkeit aufweisen. Die zulässige Toleranz an Tankstellen beträgt nach Richtlinie 2014/32/EU der Europäischen Union einheitlich $\pm 0,5\%$ (Europäisches Parlament und Europäischer Rat 2014, S. 32). Setzt man für das Einhalten der Messtoleranz das 99,5%-Konfidenzintervall an und unterstellt man eine Normalverteilung, erhält man eine Standardabweichung von rund 0,2 %.

Zuordnungsungenauigkeiten

Über die Statistiken der BAFA wird zwar der Absatz der Mineralölprodukte gegeben, jedoch geht hieraus nicht direkt die Kraftstoffmenge hervor, die im zivilen Flugverkehr eingesetzt wird. Neben dem zivilen Flugverkehr gibt es noch Kraftstoffverbräuche im Sektor „Militär“.

Um nun die Kraftstoffmenge, die dem zivilen Flugverkehr zuzurechnen ist, zu ermitteln, werden die gesamten Kraftstoffverbräuche des Militärs vom Kraftstoffabsatz abgezogen. Die folgende Tabelle zeigt die Werte des Jahres 2019.

Tabelle 40: Absatz gesamt und Verbrauch Militär von Kerosin und Flugbenzin im Jahr 2019

Energie in t

	Kerosin	Flugbenzin
Absatz gesamt	10.239.160	7.543
Verbrauch Militär	87.531	1
Absatz zivile Luftfahrt	10.151.629	7.542

Quelle: (BAFA o.J.) für das Jahr 2019 Tabelle 7j.

Um die Unsicherheit des Kraftstoffabsatzes (primäre Aktivitätsrate) wird die Formel für die Fehlerfortpflanzung verwendet. Aus den Unsicherheiten der „Unvollständigen Erhebung“ und der „Messungenauigkeit“ erhält man einen Wert von ca. 0,55 % (Formel 3). Da Teile hiervon beim Militär verbraucht, entstehen hierdurch weitere Unsicherheiten bzgl. der „Zuordnungsgenauigkeit“. Es wird angenommen, dass beim Verbrauch des Militärs eine relative Standardabweichung von 25 % vorliegt (Normalverteilung). Genauere Angaben zum Militär liegen nicht vor. Unter Berücksichtigung der drei genannten Unsicherheiten sowie der Unsicherheit bzgl. des Heizwertes können anhand einer Monte-Carlo-Simulation die relativen Unsicherheiten der Absätze in der zivilen Luftfahrt hergeleitet werden (95%-Konfidenzintervall). Diese ergeben sich zu

- ▶ Kerosin: -0,44 bis +2,06 % und
- ▶ Flugbenzin: -0,20 bis +2,67 %.

Aufgrund des Heizwertes, der in TREMOD verhältnismäßig gering angenommen ist, erhält man eine schiefe Verteilungsfunktion mit Tendenz zu höheren Werten. Es wird bei den Ergebnissen vereinfacht eine Dreiecksverteilung angenommen.

Die Unsicherheiten unter Punkt 3 resultieren zum einen aus den granularen Aktivitätsraten (Verkehrsmengen) und zum anderen aus den spezifischen Verbrauchswerten, die nach der gleichen Methode ermittelt werden wie die Emissionsfaktoren (siehe Abschnitt 2.3.1). Details zur Berechnung dieser Unsicherheiten sind dort beschrieben.

3.2.2 Granulare Aktivitätsraten – Verkehrsmengen

Die Verkehrsmengen werden nach § 12 des Verkehrsstatistikgesetzes erhoben und vom Statistischen Bundesamt (Destatis) aufbereitet. In TREMOD werden die Verkehrsmengen über eine jährliche Destatis-Sonderauswertung schlussendlich integriert. Aufgrund der verbindlichen Meldung, kann davon ausgegangen werden, dass die Daten quasi vollständig erhoben werden. Eine kleine Abweichung kann bzgl. der Differenz aus Starts und Landungen festgestellt werden. Bilanztechnisch führt dieser Unterschied zu Unschärfen insb. der Emissions- und Verbrauchsermittlung im LTO-Zyklus. Die Differenz aus Start und Landung wurde für den Zeitraum zwischen 2011 und 2019 auf analysiert (Destatis 2021). Hieraus erhält man eine relative Standardabweichung von 0,015 %, die für die Starts pro Relation angesetzt wird.

In der Sonderauswertung werden die Starts neben der Differenzierung nach Flugzeugtyp und Zielflughafen auch nach Distanzklassen differenziert. Zusätzlich wird neben der Distanzklasse auch die durchschnittliche Entfernung angegeben. So gab es bspw. 2.522 Starts innerdeutscher Flüge mit dem Airbus A320neo in der Distanzklasse 401-500 km, wobei die durchschnittliche Distanz 440,2 km betrug. Ein Fehler entsteht durch die Vereinfachung in TREMOD, dass nicht die

durchschnittliche Distanz pro Distanzklasse in TREMOD verwendet wird, sondern der Mittelwert aus der oberen und unteren Grenze der Distanzklasse. In dem Beispiel wird für die weiteren Berechnungen der Wert 450 km genutzt.

Die folgende Tabelle stellt die relative Standardabweichung der mittleren Distanzen nach Destatis ggü. TREMOD pro Distanzklasse dar. Die Werte sind anhand der Starts pro Flugzeugtyp, Zielflughafen und Distanzklasse der Jahre 2016-2019 hergeleitet. Angenommen wird eine Normalverteilung.

Tabelle 41: Relative Standardabweichungen - Großkreisdistanz

Distanzklasse	Distanz in TREMOD	σ_{relativ}	Distanzklasse	Distanz in TREMOD	σ_{relativ}
≤100km	50 km	19 %	>1900-2000km	1.950 km	0,3 %
>100-200km	150 km	6,8 %	>2000-2500km	2.250 km	1,8 %
>200-300km	250 km	8,0 %	>2500-3000km	2.750 km	1,6 %
>300-400km	350 km	2,6 %	>3000-3500km	3.250 km	1,9 %
>400-500km	450 km	0,9 %	>3500-4000km	3.750 km	3,2 %
>500-600km	550 km	1,1 %	>4000-4500km	4.250 km	1,1 %
>600-700km	650 km	1,2 %	>4500-5000km	4.750 km	1,1 %
>700-800km	750 km	0,9 %	>5000-5500km	5.250 km	2,5 %
>800-900km	850 km	0,5 %	>5500-6000km	5.750 km	1,5 %
>900-1000km	950 km	0,7 %	>6000-6500km	6.250 km	0,6 %
>1000-1100km	1.050 km	0,4 %	>6500-7000km	6.750 km	0,8 %
>1100-1200km	1.150 km	0,5 %	>7000-7500km	7.250 km	0,7 %
>1200-1300km	1.250 km	0,5 %	>7500-8000km	7.750 km	0,9 %
>1300-1400km	1.350 km	0,4 %	>8000-8500km	8.250 km	0,6 %
>1400-1500km	1.450 km	0,4 %	>8500-9000km	8.750 km	0,4 %
>1500-1600km	1.550 km	0,5 %	>9000-9500km	9.250 km	1,4 %
>1600-1700km	1.650 km	0,6 %	>9500-10000km	9.750 km	1,4 %*
>1700-1800km	1.750 km	0,4 %	>10000km	11.625 km	10 %
>1800-1900km	1.850 km	0,4 %			

Anmerkungen: *Es fanden keine Flüge in dieser Distanzklasse statt, sodass hier der Wert der nächst kleineren Klasse genommen wird.

Die Werte beziehen sich lediglich auf die Großkreisdistanz (GKD). Diese Entfernung wird in TREMOD jedoch noch angepasst, da in der Realität nicht die direkte Luftlinie zwischen den beiden Flughäfen geflogen wird (Großkreisdistanz), sondern Umwege entstehen bspw. durch bessere Luftströmungsbedingungen, An- und Abflugschneisen oder Flugverbotszonen. Dieser Umweg wird in TREMOD durch die folgenden Gleichungen abgebildet.

für GKD ≤185,2km: Umweg = 60km

für GKD >185,2km: Umweg = (GKD-185,2km) x 1,04 + 185,2km + 60km - GKD

Diese statischen Werte bilden jedoch nicht stets den exakten Umweg ab. Um die Unsicherheit bzgl. des berechneten Umwegs zu ermitteln, werden die Angaben zu Umwegen aus (Chesneau et al. 2002), (Kettunen et al. 2004) und (Reynolds 2008) verwendet. Die relative Standardabweichung ist in der folgenden Tabelle gegeben. Für die Verteilfunktion wird von einer Normalverteilung ausgegangen, außer die Standardabweichung würde zu negativen Umwegen führen. In diesem Fall, hier die Distanzklassen bis zu 500km, wird von einer Log-Normalverteilung ausgegangen.

Tabelle 42: Relative Standardabweichungen - Umweg

Distanzklasse	Umweg in TREMOD	σ_{relativ}	Distanzklasse	Umweg in TREMOD	σ_{relativ}
≤100km	60 km	54%	>1900-2000km	131 km	26%
>100-200km	60 km	54%	>2000-2500km	143 km	26%
>200-300km	63 km	54%	>2500-3000km	163 km	26%
>300-400km	67 km	54%	>3000-3500km	183 km	26%
>400-500km	71 km	54%	>3500-4000km	203 km	26%
>500-600km	75 km	44%	>4000-4500km	223 km	24%
>600-700km	79 km	39%	>4500-5000km	243 km	24%
>700-800km	83 km	34%	>5000-5500km	263 km	24%
>800-900km	87 km	34%	>5500-6000km	283 km	24%
>900-1000km	91 km	32%	>6000-6500km	303 km	24%
>1000-1100km	95 km	32%	>6500-7000km	323 km	24%
>1100-1200km	99 km	32%	>7000-7500km	343 km	24%
>1200-1300km	103 km	32%	>7500-8000km	363 km	24%
>1300-1400km	107 km	32%	>8000-8500km	383 km	24%
>1400-1500km	111 km	32%	>8500-9000km	403 km	24%
>1500-1600km	115 km	26%	>9000-9500km	423 km	24%
>1600-1700km	119 km	26%	>9500-10000km	443 km	24%
>1700-1800km	123 km	26%	>10000km	518 km	24%
>1800-1900km	127 km	26%			

Anmerkungen: Die relativen Standardabweichungen konnten nur auf einer größeren Ebene ermittelt werden, sodass viele Werte mehrmals auftauchen.

Neben den Starts und den Flugzeug-km können auch die Taxi-Zeiten zu den granularen Aktivitätsraten gezählt werden. Die Taxi-Zeit gibt an, wie lange das Flugzeug am Boden steht und, bei Teillast der Antriebswerke, rangiert wird. Die Taxi-Zeiten werden in TREMOD flugzeugtypenfein anhand der durchschnittlichen Taxi-Zeiten pro Flughafen und den Anzahl Starts pro Flugzeugtyp und Flughafen ermittelt. Die relativen Standardabweichungen pro

Flughäfen sind über (Eurocontrol 2021) gegeben und sind in Tabelle 43 zusammengefasst. Es handelt sich um eine Normalverteilung.

Tabelle 43: Relative Standardabweichungen – Taxi-Zeiten

ICAO-Code	Flughafen	Mittelwert [s]	$\sigma_{\text{relativ}} [\%]$
EDDB	Berlin Schönefeld	1.115	36%
EDDC	Dresden	761	20%
EDDF	Frankfurt a. M.	1.389	30%
EDDG	Münster/Osnabrück	618	26%
EDDH	Hamburg	904	28%
EDDK	Köln/Bonn	966	25%
EDDL	Düsseldorf	1.057	27%
EDDM	München	1.171	28%
EDDN	Nürnberg	788	31%
EDDP	Leipzig/Halle	1.024	27%
EDDR	Saarbrücken	613	22%
EDDS	Stuttgart	955	33%
EDDT	Berlin Tegel	933	25%
EDDV	Hannover	917	29%
EDDW	Bremen	770	25%
EDFH	Frankfurt Hahn	1.244	32%
EDJA	Memmingen	1.013	27%
EDLP	Paderborn/Lippstadt	802	28%
EDLV	Niederrhein	888	14%
EDLW	Dortmund	977	28%
EDNY	Friedrichshafen	701	28%
EDSB	Karlsruhe/Baden-Baden	829	22%
EDVE	Braunschweig/Wolfsburg	511	26%
-	Sonstige*	1.000	27%

Anmerkung: *Für die sonstigen Flugplätze wird der Mittelwert aus allen Hauptverkehrsflughäfen verwendet.

3.3 Schichtemissionsfaktoren

Verbrauch, CO, Gesamtstaub (PM), NO_x, HC

Die Schichtemissionsfaktoren entsprechen beim Flugverkehr den Emissionsfaktoren pro Flugzeugtyp. Unsicherheiten entstehen hier auf drei Ebenen:

a) Messungen

b) Typenerfassung

c) Modellierung/Real

Die verwendeten Emissionsfaktoren werden überwiegend dem „*Master emissions calculator*“ der EEA entnommen (EEA 2019). Dieser basiert auf Modellen von Eurocontrol, welche sich wiederum u. a. auf Messdaten stützen (Eurocontrol 2016). Diese Messdaten werden insb. von der ICAO in einer Turbinendatenbank zusammengefasst (ICAO 2019). Über die Modellierung werden sowohl die Verbräuche als auch die Schadstoffemissionen CO, PM, NO_x, HC ermittelt.

Eine weitere Unsicherheitsquelle ist die Typenerfassung. Nicht alle Flugzeugtypen in TREMOD sind durch die EEA gegeben, sodass bei einigen Flugzeugtypen eigene Abschätzungen anhand des MTOW und der Antriebsart oder anhand der eingesetzten Turbine durchgeführt werden.

Zudem können die in der Realität auftretenden Verbräuche und Emissionen von den modellierten Werten abweichen. Gründe hierfür sind u. a. reales Flugzeuggewicht, Luftströmungen, Temperatur und Luftdruck. Für den Verbrauch sowie den vier Schadstoffen CO, PM, NO_x und HC sind demnach die Unsicherheiten zu ermitteln. Die sonstigen THG- und Schadstoffemissionen hängen direkt vom Kraftstoffverbrauch oder den vier Schadstoffen ab und werden weiter unten separat beschrieben.

Messungen:

Die Modellierung stützen sich insb. auf den Messdaten, die in der ICAO-Turbinendatenbank zusammengefasst sind. In der Datenbank sind neben den Mittelwerten der genannten Emissionen [g/kN] auch die absoluten Standardabweichungen angegeben. So weist die Turbine GE90-110B1 (UID: 21GE182) bspw. mittlere HC-Emissionen von 4,14 g/kN bei einer Standardabweichung von 0,28 g/kN auf. In diesem Beispiel wurden sechs Tests an zwei Turbinen durchgeführt. Folgende Tabelle zeigt die Anzahl der Turbinen, die für die Unsicherheitenanalyse der Messungen berücksichtigt wurden.

Tabelle 44: Anzahl berücksichtigter Turbinen für Unsicherheitenanalyse der Messungen

HC	CO	NO _x	PM
396	441	441	179

Die Übertragung der Unsicherheiten pro Turbine auf die eingesetzte Flotte ist problematisch, da in den Aktivitätsraten zwar Informationen über den Flugzeugtyp, nicht aber über die eingesetzten Turbinen gegeben werden. Zudem werden durch den *Master emission calculator* nicht alle Turbinen abgedeckt, sodass hier Lücken vorliegen. Demnach werden Vereinfachungen vorgenommen.

In TREMOD sind (aktuell) 309 Flugzeugtypen definiert. 153 Flugzeugtypen sind direkt über den *Master emission calculator* definiert. Für diese Flugzeugtypen werden einheitliche relative Standardabweichungen angenommen. Diese ergeben sich aus den einzelnen Standardabweichungen pro Turbine aus der ICAO-Turbinendatenbank gewichtet mit jeweils einem Faktor. Dieser Gewichtungsfaktor soll die Marktanteile der jeweiligen Turbine widerspiegeln und wird über (Morrison 2015) abgeleitet. Turbinen, die nicht in der Quelle genannt werden, werden zu einem kleinen Teil ebenfalls berücksichtigt. Tabelle 45 listet die relativen Standardabweichungen und Gewichtungsfaktoren der am häufigsten eingesetzten Turbinen. Zudem wird in der Tabelle die abgeleiteten relativen Standardabweichungen der Schadstoffe HC, CO, NO_x und PM angegeben. Es wird eine Normalverteilung angenommen.

Tabelle 45: Relative Standardabweichungen und Gewichtungsfaktoren der Messwerte von HC, CO, NO_x und PM

σ_{relativ} in %, Gewichtungsfaktor wird in Klammern angegeben

Turbine	HC	CO	NO _x	PM
CFM56	13% (0,41)	5% (0,41)	3% (0,41)	24% (0,48)
P&W JT8D	25% (0,22)	10% (0,22)	11% (0,22)	- (0,00)
GE CF6	10% (0,11)	5% (0,11)	3% (0,11)	7% (0,13)
IAE V2500	- (0,00)	- (0,00)	- (0,00)	3% (0,12)
GE CF34	8% (0,10)	3% (0,10)	2% (0,10)	32% (0,12)
RR RB211	7% (0,05)	5% (0,05)	3% (0,05)	- (0,00)
Sonstige	26% (0,11)	10% (0,11)	3% (0,11)	20% (0,13)
abgeleitet	16%	6%	5%	20%

Quelle: Eigene Ermittlung anhand (ICAO 2019). Anmerkung: Die Standardabweichungen werden für beide Flugphasen angenommen.

Die Unsicherheiten der Kraftstoffverbrauchsmessung ist nicht in der Turbinendatenbank gegeben und wird über (Yang 2011) abgeleitet. Es wird von einer relativen Standardabweichung des Verbrauchs für Messungen in der LTO-Phase von 1,22 % und in der CCD-Phase von 1,19 % ausgegangen. Es wird von einer Normalverteilung ausgegangen.

Typenerfassung:

Für die o. g. 153 Flugzeugtypen wird davon ausgegangen, dass die Typenerfassung genau ist. Das heißt, dass die in den von Destatis gegebenen Aktivitätsraten pro Flugzeugtyp exakt zu den Emissionsfaktoren pro Flugzeugtyp passen. Dies ist jedoch nur eine Vereinfachung, da im *Master emissions calculator* die Emissionen pro Flugzeugtyp nur für die gängigste Turbine gegeben ist. Allerdings können einige Flugzeugtypen (z. B. A320-100) mit unterschiedlichen Turbinentypen bestückt werden (in dem Beispiel mit CFM56-5A oder IAE V2527-A5). Hierdurch entsteht zwar ein Fehler, aber da dieser zum einen nicht quantifiziert werden kann und zum anderen als gering erachtet wird, wird der Fehler durch eine ungenaue Typenerfassung hier vernachlässigt.

49 Flugzeugtypen sind generische Flugzeugtypen, d. h. über die Aktivitätsraten von Destatis sind lediglich Informationen über das MTOW und der Antriebsart (Jet, Propeller, Turbo-Prop, Sonstige) gegeben. Da in den definierten MTOW-Klassen (z. B. Cessna Prop. 2 bis 5,7 t) unterschiedliche Flugzeuge zusammengefasst werden, die ein sehr unterschiedliches Verbrauchs- und Emissionsverhalten aufweisen können, sind die Unsicherheiten bei diesen generischen Modellen deutlich höher. Hierfür wurde eine Analyse durchgeführt wie stark die Emissionsfaktoren und Verbräuche innerhalb der Größenklassen variieren. Die Analyse wurde auf Basis des *Master emissions calculator* durchgeführt. Vereinfachend wird für jedes generische Modell pro Antriebsart und Flugphase dieselbe relative Standardabweichung verwendet. Die folgende Tabelle fasst die relativen Standardabweichungen der Typenerfassung für die generischen Flugzeugtypen zusammen.

Tabelle 46: Relative Standardabweichungen der Typenerfassung von Verbrauch, HC, CO, NO_x und PM generischer Flugzeugtypen

σ_{relativ} in %

Antrieb	Phase	Verbrauch	HC	CO	NO _x	PM
Propeller (Kolben)	LTO	55%	89%	75%	59%	159%
	CCD	159%	66%	90%	42%	151%
Turbo-Prop	LTO	13%	128%	91%	59%	*109%
	CCD	19%	138%	92%	58%	*113%
Jet	LTO	19%	106%	40%	41%	60%
	CCD	31%	131%	63%	59%	75%
Sonstige**	LTO	29%	108%	68%	53%	109%
	CCD	69%	112%	82%	53%	113%

Quelle: Eigene Ermittlung, ifeu anhand (EEA 2019). Anmerkungen: *Wert konnte nicht abgeleitet werden; Es wird der Mittelwert von Jets und Propeller (Kolben) verwendet. **Die Unsicherheiten der sonstigen Flugzeuge (z. B. Hubschrauber) wurden aus Aufwandsgründen nicht ermittelt. Hier wird vereinfacht der Mittelwert der drei Antriebsarten verwendet.

52 der 309 Flugzeugtypen werden durch den „Master emissions calculator“ nicht direkt definiert und erhalten die Emissionsfaktoren vergleichbarer Flugzeuge (z. B. „Beech C99 Airliner“ erhält die Kenndaten des Beech 99). Hier sind größere Unsicherheiten anzusetzen als bei den Typen, die direkt durch die EEA gegeben werden, aber die Unsicherheiten sind geringer als bei den generischen Flugzeugtypen. Für diese Flugzeugtypen wird angenommen, dass die relativen Standardabweichungen der Typenerfassung zwischen den zugeordneten direkt definierten und generischen Flugzeugtypen liegen. Die relative Standardabweichung wird auf 2/3 der Werte der generischen Flugzeugtypen gesetzt. Tabelle 47 fasst die relativen Standardabweichungen der zugeordneten Flugzeugtypen zusammen.

Tabelle 47: Relative Standardabweichungen der Typenerfassung von Verbrauch, HC, CO, NO_x und PM zugeordneter Flugzeugtypen

σ_{relativ} in %

Antrieb	Phase	Verbrauch	HC	CO	NO _x	PM
Propeller (Kolben)	LTO	28%	53%	41%	32%	89%
	CCD	80%	41%	48%	23%	85%
Turbo-Prop	LTO	7%	72%	49%	32%	64%
	CCD	10%	77%	49%	31%	66%
Jet	LTO	10%	61%	23%	23%	40%
	CCD	16%	74%	35%	32%	48%
Sonstige	LTO	15%	62%	37%	29%	64%
	CCD	35%	64%	44%	29%	66%

Quelle: Eigene Ermittlung, ifeu.

Die Verbräuche und Emissionen der restlichen 54 Flugzeugtypen sind durch die *ICAO-Turbinendatenbank* definiert. Da die LTO-Phase analog zur Methode des *Master emissions calculator* errechnet wird, sind für diese Phase dieselben Unsicherheiten anzusetzen wie für die direkt definierten Flugzeugtypen. Demnach entstehen auf der Ebene der Typenerfassung keine Fehler. Für die CCD-Phase werden für die nach der Turbinendatenbank definierten Typen angenommen, dass die Unsicherheit zwischen den Unsicherheiten der direkt definierten und der generischen Flugzeugtypen anzusiedeln ist. Die relative Standardabweichung in der CCD-Phase wird auf 1/3 der Werte der generischen Flugzeugtypen gesetzt. Die folgende Tabelle fasst die relativen Standardabweichungen der Flugzeugtypen, die aus der Turbinendatenbank abgeleitet sind, zusammen. Es wird, abgesehen von HC-Emissionen in der CCD-Phase, bei denen von einer Log-Normalverteilung ausgegangen wird, eine Normalverteilung unterstellt. Bei diesen Flugzeugtypen handelt es sich ausschließlich um Jets.

Tabelle 48: Relative Standardabweichungen der Typenerfassung von Verbrauch, HC, CO, NO_x und PM aus der Turbinendatenbank abgeleiteter Flugzeugtypen

σ_{relativ} in %

Phase	Verbrauch	HC	CO	NO _x	PM
LTO	1%	5%	6%	16%	20%
CCD	11%	47%	25%	30%	38%

Quelle: Eigene Ermittlung, ifeu.

Im ZSE werden die Partikelemissionen (PM) noch weiter differenziert nach Gesamtstaub, PM₁₀ und PM_{2,5}. Gesamtstaub mit den PM-Emissionen gleichgesetzt. Unter anderem aus (Jasiński et al. 2021) und (Kugele et al. 2005) geht hervor, dass massenbezogen praktisch alle Emissionen einen kleineren Durchmesser als 2,5 µm aufweisen. Demnach sind sowohl Mittelwert als auch die relative Standardabweichung für Gesamtstaub, PM₁₀ und PM_{2,5} identisch.

Modellierung - Real:

Neben den Unsicherheiten bei den Eingangsdaten (Messungen) für die Emissionsmodellierung und der Typenerfassung, gibt es auch Unsicherheiten bei der Modellierung. Hier können Unterschiede zwischen den Modellannahmen und der realen Bedingungen auftreten, sodass Differenzen in den Ergebnissen (Verbrauch, Emissionen) entstehen können. In (Schaefer 2012) werden mögliche Einflussfaktoren angegeben. Hier werden insbesondere der Windeinfluss, die Temperatur, das reale Flugzeuggewicht (inkl. Treibstoff, Stichwort: „Fuel tankering“) und die Alterung der Flugzeuge bzw. Triebwerke genannt. Tabelle 49 gibt die relativen Standardabweichungen der genannten Aspekte an und die hieraus resultierende gesamte relative Standardabweichung für die Ebene „Modellierung – Real“. Die gesamte Standardabweichung wird über die Fehlerfortpflanzung (Formel 3) bestimmt. Es liegt eine Normalverteilung vor.

Tabelle 49: Relative Standardabweichungen auf der Ebene „Modellierung – Real“

σ_{relativ} in %

Einflussgröße	σ_{relativ}
Wind:	1,16%
Temperatur:	0,47%
Gewicht:	4,04%
Alterung:	6,00%
Gesamt	7,34%

Quelle: (Schaefer 2012).

Die drei Ebenen „Messungen“, „Typenerfassung“ und „Modellierung/Real“ werden für die Monte-Carlo-Analyse zur Bestimmung der ZSE-Emissionsfaktoren und der Aufteilung des Kraftstoffverbrauchs auf nationale/internationale Flüge zusammengefügt. Hierfür werden die Standardabweichungen der drei Ebenen über die Fehlerfortpflanzung (siehe Formel 3 in Abschnitt 1.2.2) zusammengefasst. Die Unsicherheiten der Ebene „Modellierung – Real“ bezieht sich zwar nur auf den Verbrauch, aber es wird vereinfachend angenommen, dass auch die direkt gegebenen Emissionen CO, PM, NO_x und HC dieselbe Unsicherheit aufweisen. Problematisch kann diese Annahme sein, wenn man die Unsicherheiten der Schadstoffemissionen auf den Kraftstoff bezieht (wie dies bei den ZSE-Emissionsfaktoren der Fall ist). Denn bei der Monte-Carlo-Analyse würde in dem Fall z. B. in einem Rechenschritt die NO_x-Emissionen und der Verbrauch reduziert, wobei rein physikalisch die NO_x-Emissionen tendenziell mit steigender Last und somit auch höherer Brennraumtemperatur steigen müsste. Daher kann diese Annahme als konservativ erachtet werden, wobei der Fehler durch diese Annahme als gering bewertet wird.

CH₄, N₂O, NH₃, SO₂, NMVOC, BC

Neben den o. g. Schadstoffemissionen werden im ZSE auch andere Schadstoffe und THG berichtet, die in TREMOD berechnet werden, aber nicht durch den *Master emissions calculator* gegeben sind. Diese Emissionen werden in TREMOD über spezifische Emissionsfaktoren bezogen auf den Verbrauch oder andere Emissionen gegeben. Tabelle 50 gibt die weiteren im ZSE geforderten THG und Schadstoffe an, sowie die Bezugsgröße mit denen sie in TREMOD modelliert werden.

Tabelle 50: Abhängige Emissionen und ihre Bezugsgröße in TREMOD-AV

THG, Schadstoff	Bezugsgröße
CH ₄	HC
N ₂ O	Kraftstoffverbrauch
NH ₃	Kraftstoffverbrauch
SO ₂	Kraftstoffverbrauch
NMVOC	HC
BC	PM

Quelle: (IFEU und Öko-Institut 2010).

Kraftstoffabhängige Emissionen N₂O, NH₃, SO₂

Die N₂O-Unsicherheit wird über (Santoni et al. 2011) ermittelt. Hier werden Bandbreiten der N₂O-Emissionen für unterschiedliche Lastzustände gegeben. Aus diesen Angaben kann ein Minimalwert von 14 und ein Maximalwert von 160 mg/kg_{Kraftstoff} abgeleitet werden. Da keine Informationen zu den Antriebsarten vorliegen, wird die Bandbreite für alle Antriebe/Kraftstoffarten übernommen. Die in TREMOD verwendeten Werte weichen von dem Mittelwert der Grenzwerte ab, sodass hier die Dreiecksverteilung verwendet wird. Folgende Werte sind in TREMOD für die N₂O-Emissionen hinterlegt: 100 mg/kg für CCD Kerosin, 120 mg/kg für LTO national Kerosin, 90 mg/kg für LTO international Kerosin und 100 mg/kg für Flugbenzin.

Für NH₃ ist zwar ein Emissionsfaktor für Kerosin in Höhe von 0,17 g/kg_{Kerosin} in TREMOD hinterlegt, jedoch weist die Literatur¹¹ darauf hin, dass keine (oder vernachlässigbare) NH₃-Emissionen aus dem Flugverkehr resultieren. Daher wird angenommen, dass eine Gleichverteilung für Kerosin zwischen 0 und 0,17 g/kg_{Kerosin} vorliegt. Es liegen keine Angaben zu NH₃-Emissionen für Flugbenzin vor und in TREMOD sind keine NH₃-Emissionen für Flugbenzin hinterlegt. Demnach wird hier keine Unsicherheit ermittelt.

(Jurkat et al. 2011) gibt für SO₂ Messunsicherheiten von $\sigma_{rel} = 25\%$ an. Aus (Chevron 2007) folgt, dass der Schwefelgehalt von Kerosin im Bereich von 500-1.000 ppm liegt. Dies entspricht einer relativen Standardabweichung von ca. 33 %. Auf Basis beider Angaben wird vereinfacht eine relative Standardabweichung von 29 % für beide Kraftstoffarten angenommen. Es wird eine Normalverteilung angenommen.

HC- und PM-abhängige Emissionen CH₄, NMVOC, BC

Die Methanemissionen sind in TREMOD als prozentualer Anteil der HC-Emissionen definiert. In (Santoni et al. 2011) sind die Bandbreiten der CH₄-Emissionen unterschiedlicher Turbinentypen bei verschiedenen Kraftstoffsorten (z. B. JP-4, Jet A) und Lastzuständen angegeben. Hieraus können Eckwerte von 10 bis 330 mg/kg_{Kraftstoff} für LTO und -87 bis -21 mg/kg_{Kraftstoff} für CCD ermittelt werden. Die negativen Werte weisen darauf hin, dass atmosphärisches Methan von der Turbine umgesetzt wird. Errechnet man über TREMOD hieraus die Anteile an den HC-Emissionen, so erhält man die Bandbreiten aus Tabelle 51. Sofern der in TREMOD verwendete Wert größer ist als der maximale Anteil nach (Santoni et al. 2011), dann wird eine Gleichverteilung zwischen dem Minimalwert und dem TREMOD-Wert angenommen. Wenn der TREMOD-Wert innerhalb der Bandbreite ist, so wird eine Dreiecksverteilung angenommen.

¹¹ (Dellaert und Dröge 2017), (Winther 2020), (Tarrasón et al. 2004)

Tabelle 51: Bandbreiten von CH₄ pro Flugphase und Kraftstoffart

σ in %-Punkte

Kraftstoffart	Zielflughafen	Phase	Minimaler Anteil an HC	Maximaler Anteil an HC	Anteil an HC in TREMOD
Kerosin	national	CCD	-15,4%	-3,7%	0%
		LTO	0,8%	23,5%	20%
	international	CCD	-15,4%	-3,7%	0%
		LTO	1,1%	33,8%	20%
Flugbenzin	national	CCD	-0,4%	0,0%	0%
		LTO	0,1%	0,9%	20%
	international	CCD	-0,5%	-0,1%	0%
		LTO	0,1%	1,2%	20%

Quellen: Eigene Ermittlung anhand (Santoni et al. 2011) und TREMOD.

Die Unsicherheiten der NMVOC-Emissionen ergeben sich direkt aus den Unsicherheiten der HC- und CH₄-Emissionen, denn die NMVOC entsprechen der Differenz beider Schadstoffe. Hierbei wird angenommen, dass die HC-Emissionen näherungsweise den VOC-Emissionen entsprechen. Demnach ist die Standardabweichung von NMVOC eine resultierende Größe der Monte-Carlo-Analyse und keine Eingangsgröße.

Ruß (BC) stellt eine Fraktion der Partikelemissionen (PM) dar. Es wird angenommen, dass die nicht-volatilen PM komplett aus BC bestehen (Whiteley 2018). Im *Master emissions calculator* werden neben den gesamten PM auch die Mengen der volatilen (insb. organische Partikel, Sulfate und Wasser¹²) und nicht-volatilen Partikel pro Flugzeugtyp angegeben. Zur Abschätzung der Unsicherheit der BC-Emissionen werden die Anteile der nicht-volatilen PM an den gesamten PM pro Flugzeugtyp ausgewertet. Sofern man Ausreißer (jeweils kleinste bzw. größte 5 %) eliminiert, erhält man eine Bandbreite von 12 % bis 60 %. Der in TREMOD verwendete Wert (48 %) ist zwar in der Bandbreite, aber weicht von dem aus der Analyse resultierende Mittelwert ab, sodass eine Dreiecksverteilung für Kerosin angenommen wird. Für Flugbenzin wird vereinfacht eine relative Standardabweichung von 60 % (ergibt sich aus der Analyse) angenommen und die Unsicherheitenanalyse auf den TREMOD-Wert von 15 % BC/PM angewendet. Es wird hier eine Log-Normalfunktion unterstellt.

3.4 Unsicherheiten auf Ebene ZSE

3.4.1 Emissionsfaktoren

Die Bestimmung der Unsicherheiten aufgrund der Fehlerfortpflanzung in der Berechnung der ZSE-Emissionsfaktoren erfolgt wie in Abschnitt 1.2.2.3 erwähnt, anhand der Monte-Carlo-Analyse. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Emissionsfaktoren aus rund 15.000 Einzellaufen für die Kraftstoffe Flugbenzin und Kerosin, unterteilt nach Flugphasen LTO (Landing, Take-Off) und CCD (Climb, Cruise, Descent) sowie nach Relationstypen (national, international) für das Jahr 2019 dargestellt. Die zuvor ermittelten Unsicherheiten der Eingangsdaten (Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren) werden auf Relationsebene für jeweils eingesetzten Flugzeugtypen angesetzt und nicht für jeden Einzelflug herangezogen. Damit

¹² (Kugele et al. 2005)

erfolgt die Bestimmung der Unsicherheiten analog der Berechnungslogik, wie sie in TREMOD-AV implementiert ist.

Abweichende Mittelwerte der anhand der Monte-Carlo-Simulation bestimmten Verteilungen der Emissionsfaktoren und Verbrauchswerte zu den bisher in der Berichterstattung ausgewiesenen Werten aus TREMOD-AV, ergeben sich aus abweichenden Mittelwerten in den neu ermittelten Unsicherheitsverteilungen der Aktivitätsdaten sowie der Schichtemissionsfaktoren gegenüber den in TREMOD-AV hinterlegten Eingangswerten. Dies bedeutet nicht, dass der Wert aus TREMOD unplausibel ist, dennoch kann eine Abweichung des Mittelwerts aus der Monte-Carlo-Simulation darauf hinweisen, dass die in TREMOD verwendeten Werte tendenziell zu positiv oder negativ verglichen mit den in der Literatur gegebenen Werten sind. Auf diesen Sachverhalt wird in Abschnitt 4.2 eingegangen.

Die ermittelten und in den folgenden Abschnitten dargestellten Unsicherheiten beziehen sich auf die bisher ausgewiesenen Werte aus TREMOD-AV und nicht auf die neu bestimmten Mittelwerte der berechneten Verteilfunktionen der Monte-Carlo-Simulation je Schadstoff oder Treibstoffverbrauch. Als Grundlage der Unsicherheitsbestimmung dienen somit die Standardabweichungen bzw. Varianzen der jeweiligen Einzelwerte der berechneten Verteilungen bezogen auf den TREMOD-Mittelwert und nicht dem entsprechenden Mittelwert der Verteilung, die sich aus der Simulation ergibt. Welche Probleme und Schlussfolgerungen sich hieraus ergeben werden in Kapitel 4.2 diskutiert.

3.4.1.1 Emissionsfaktoren der LTO-Phase (Landing, Take-Off)

International

Zunächst werden die Emissionsfaktoren des internationalen Flugverkehrs dargestellt, siehe Tabelle 52. Die geringsten Unsicherheiten ergeben sich bei der verbrauchten Masse an Kraftstoff (mKr) pro Energiemenge. Hier fließt insbesondere die Unsicherheit des Heizwertes ein. Die relativen Unsicherheiten liegen bei beiden Kraftstoffen unter 3 %.

Geringe Unsicherheiten liegen bei Kerosin für die Schadstoffe CO, NO_x, SO₂, N₂O und PM vor. Hier liegen die relativen Unsicherheiten bei unter 10 %. Bei CH₄, NMVOC und BC sind die relativen Unsicherheiten höher und belaufen sich auf einen Bereich von 10 bis 35 %. Die höchsten Unsicherheiten bestehen bei Ammoniak mit ±99 %.

Beim Flugbenzin sind die Unsicherheiten im Schnitt deutlich höher. Außer bei NMVOC-, CH₄- und CO-Emissionen sind die Anteile der THG- und Schadstoffemissionen, die von Flugzeugen mit Flugbenzin betrieben werden, an den Gesamtemissionen jedoch vernachlässigbar. Für die genannten Emissionen liegen hohe relative Unsicherheit im Bereich von rund -68 bis +140 % vor. Hieraus folgt, dass auch die ermittelten absoluten Emissionen von NMVOC, CH₄ und CO des zivilen Flugverkehrs hohen Unsicherheiten unterliegen.

Tabelle 52: Energiespezifische Emissionsfaktoren internationaler Flüge in der LTO-Phase und deren relativen Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervall)

Schadstoff	Flugbenzin, Emission in kg/TJ (TREMOD-AV 2019)	Flugbenzin, rel. Unsicherheit	Kerosin, Emission in kg/TJ (TREMOD-AV 2019)	Kerosin, rel. Unsicherheit
CH ₄	136,7	[-67,5%; 137,7%]	4,8	[-26,8%; 26,8%]
NMVOC ¹	546,9	[-57,3%; 100,4%]	19,4	[-17,9%; 20,6%]
CO	22.858,1	[-46,4%; 70,9%]	186,9	[-6,3%; 6,6%]
NO _x	55,9	[-48,3%; 75,5%]	358,2	[-5,5%; 5,5%]
mKr ²	22.965,8	[-2,5%; 2,5%]	23.364,5	[-1,7%; 1,7%]
SO ₂	0,5	[-25,1%; 25,1%]	19,6	[-6,7%; 6,7%]
N ₂ O	2,3	[-32%; 32%]	2,1	[-9,4%; 9,4%]
NH ₃	0,0	[-; -] ³	4,0	[-99%; 99%]
PM ⁴	74,7	[-78,3%; 195,7%]	2,3	[-7%; 7%]
BC	11,2	[-83,9%; 239,1%]	1,1	[-34,8%; 34,8%]

Anmerkung: ¹NMVOC wird gleich NMHC gesetzt und ermittelt sich aus der Differenz von HC- und CH₄-Emissionen. ²mKr entspricht dem Kehrwert des Heizwerts. ³Relative Abweichung nicht ermittelbar, da keine Indizien für NH₃-Emissionen bei Flugbenzin vorliegen. ⁴Da alle Partikel kleiner als 2,5 µm sind, ist PM=PM₁₀=PM_{2,5}.

National

Die geringsten relativen Unsicherheiten liegen bei den nationalen LTO-Emissionen ebenfalls bei mKr vor (<3 %). Stickoxide (NO_x) und Schwefeldioxid (SO₂) können bei Kerosin mit einer hohen Genauigkeit ermittelt werden (<10 %). Etwas höher sind die Unsicherheiten von CO, N₂O, PM und BC mit nahezu bis ±40 %. Hohe Unsicherheiten weisen CH₄, NMVOC und NH₃ auf (-51 bis +81 %).

Bei Flugbenzin sind die Unsicherheiten bei allen THG und Schadstoffen höher als bei Kerosin. Hintergrund ist insbesondere die deutlich geringere Datenqualität von sowohl den Verkehrsmengen (hier fehlen überwiegend die Flugdistanzen) als auch den Schichtemissionsfaktoren, überwiegend aufgrund fehlender Informationen zu den eingesetzten Flugzeugtypen. Die Unsicherheiten der Emissionen beim Flugbenzin erstrecken sich von -89 bis +298 %. Problematisch sind diese hohen Zahlen insbesondere für die Quantifizierung der NMVOC-, CH₄- und CO-Emissionen.

Tabelle 53: Energiespezifische Emissionsfaktoren nationaler Flüge in der LTO-Phase und deren relativen Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervall)

Schadstoff	Flugbenzin, Emission in kg/TJ (TREMOD-AV 2019)	Flugbenzin, rel. Unsicherheit	Kerosin, Emission in kg/TJ (TREMOD-AV 2019)	Kerosin, rel. Unsicherheit
CH ₄	164,9	[-71,4%; 155,9%]	10,2	[-50,6%; 81,4%]
NMVOC ¹	659,5	[-74,4%; 171,6%]	40,6	[-44,4%; 66,4%]
CO	17.045,9	[-68,2%; 140,8%]	267,6	[-26%; 26%]
NO _x	92,0	[-63,8%; 122,8%]	311,7	[-7,9%; 7,9%]
mKr ²	22.965,8	[-2,5%; 2,5%]	23.364,5	[-1,7%; 1,7%]
SO ₂	0,5	[-37,9%; 37,9%]	19,6	[-8,9%; 8,9%]
N ₂ O	2,3	[-43,5%; 43,5%]	2,8	[-38%; 38%]
NH ₃	0,0	[--; -] ³	4,0	[-99,2%; 99,2%]
PM ⁴	34,2	[-87,9%; 281,1%]	3,0	[-15,5%; 15,5%]
BC	5,1	[-89,3%; 298,1%]	1,5	[-36,7%; 36,7%]

Anmerkung: ¹NMVOC wird gleich NMHC gesetzt und ermittelt sich aus der Differenz von HC- und CH₄-Emissionen. ²mKr entspricht dem Kehrwert des Heizwerts. ³Relative Abweichung nicht ermittelbar, da keine Indizien für NH₃-Emissionen bei Flugbenzin vorliegen. ⁴Da alle Partikel kleiner als 2,5 µm sind, ist PM=PM₁₀=PM_{2,5}.

Verteilungsfunktionen

Neben den relativen Unsicherheiten sind für die Emissionsinventare ebenfalls die jeweiligen Verteilungsfunktionen anzugeben. Die Auswahl der anzugebenden Funktionen beschränkt sich auf derer der Normal- und Log-Normalverteilung. Problematisch ist die Zuordnung aufgrund des Analyseverfahrens (Monte-Carlo-Simulation) und insb. aufgrund der Verteilfunktionen, die für die Eingangsparameter (primäre und granulare Aktivitätsraten) gewählt wurden, wie Gleich-, Dreiecks-, Normal und Log-Normalverteilungsfunktion und dem Umstand, dass der TREMOD-Wert als Mittelwert der jeweiligen Funktion zu setzen ist. Hierdurch werden die angegebenen Unsicherheiten in den meisten Fällen größer gegenüber denjenigen, die direkt aus den Werteverteilungen der Monte-Carlo-Analysen abgeleitet werden können und sich auf den Simulationsmittelwert beziehen.

Mit am deutlichsten spiegelt sich das bspw. in den Unsicherheiten für LTO-international-Kerosin im Falle von BC wider. Hier liegen beide Grenzwerte der Unsicherheiten aus der Monte-Carlo-Analyse unterhalb des TREMOD-Werts. Der Hauptgrund hierfür ist, dass der Heizwert, der in TREMOD angenommen wird, die untere Grenze einer Dreiecksverteilung darstellt und zudem der Anteil von BC an PM ebenfalls mit einer Dreiecksverteilung angenommen wird bei dem der TREMOD-Wert dem oberen Rand dieser Dreiecksverteilung entspricht. Beide Einflüsse überlagert führen dazu, dass bei der Berechnung der energiespezifischen BC-Emissionen alle Ergebniswerte aus der Monte-Carlo-Simulation geringer sind als der TREMOD-Wert. Ferner entsprechen dadurch die resultierende Verteilungsfunktion nicht exakt einer Normal- oder Log-Normalverteilung. Daraus resultiert auch, dass der Mittelwert aus der Berechnung für BC-LTO-international-Kerosin 0,89 kg/TJ beträgt wogegen der TREMOD-Wert bei 1,08 kg/TJ liegt, siehe Abbildung 32.

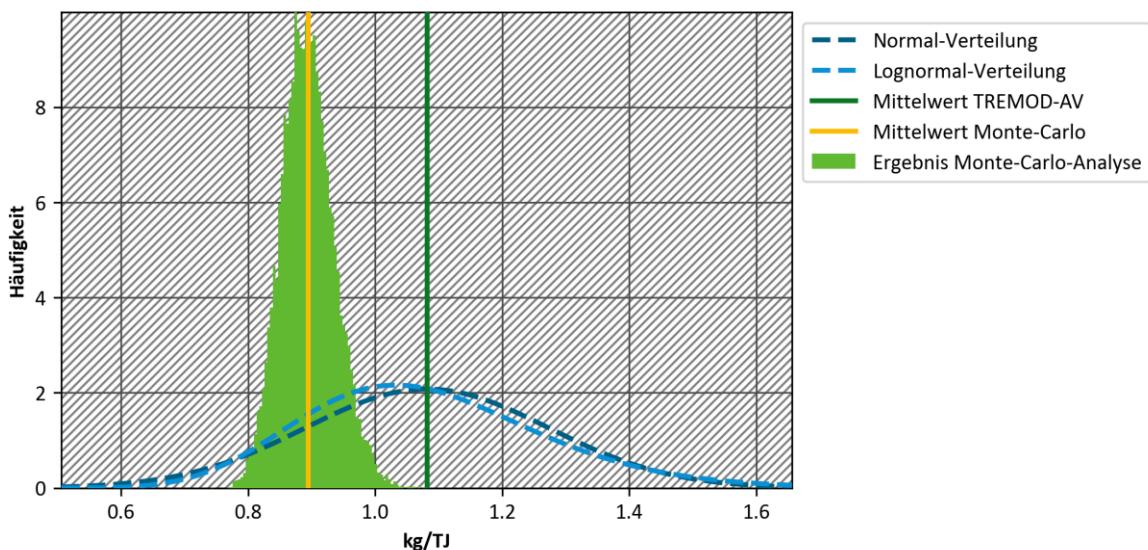
Da für die Emissionsinventare die Unsicherheiten auf die berichteten Werte (TREMOD)

beziehen, aber nicht auf die Mittelwerte der Simulation, führt dies zu einer weiteren Verzerrungen der anzuwendenden Verteilungsfunktionen, die das Unsicherheitsintervall vergrößern. Nichtsdestoweniger werden die Simulationsergebnisse einer der zwei geforderten Verteilungsfunktionen (normal und log-normal) zugeordnet. So wird der Schadstoff aus dem Beispiel, BC aus Kerosinverbrauch internationaler Flüge in der LTO-Phase am besten durch eine Normalfunktion beschrieben, siehe Abbildung 32.

Abbildung 32: Simulationsergebnisse für die spezifischen Emissionen an Black Carbon (BC) in der LTO-Phase internationaler Flüge mit Kerosin-Treibstoff

International, LTO, Kerosin (K)

BC | Normal(0.025, 0.975): 0.71kg/TJ, 1.46kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 0.75kg/TJ, 1.50kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Trotz der Zuordnungsprobleme wird jeder der beschriebenen Emissionen eine Verteilfunktion zugewiesen. Diese werden in Tabelle 54 angegeben. Um weitergehende Analysen durchführen zu können, werden im Anhang B.1 (LTO) und B.2 (CCD) die Histogramme jedes Schadstoffs mitsamt der ermittelten Verteilungsfunktion, der am besten passenden Verteilungsfunktion, dem Mittelwert und der Unsicherheiten angegeben, analog zu Abbildung 32.

Tabelle 54: Zugeordnete Verteilungsfunktionen der Ergebnisse der LTO-Phase aus der Monte-Carlo-Simulation

Schadstoff	Flugbenzin international	Kerosin international	Flugbenzin national	Kerosin national
CH ₄	normal	normal	normal	normal
NMVOC	log-normal	normal	log-normal	log-normal
CO	log-normal	normal	log-normal	log-normal
NO _x	log-normal	normal	log-normal	normal
mKr	normal	normal	normal	normal
SO ₂	normal	normal	normal	normal
N ₂ O	normal	normal	normal	normal
NH ₃	-	normal	-	normal
PM	log-normal	normal	log-normal	normal
BC	log-normal	normal	log-normal	normal

3.4.1.2 Emissionsfaktoren der CCD-Phase (Climb, Cruise, Descent)

International

Zunächst werden die relativen Unsicherheiten der Flugphase internationaler Flüge beschrieben, siehe Tabelle 55. Wie bei der LTO-Phase liegt auch hier die höchste Genauigkeit bei mKr (und somit auch des Heizwertes) für beide Kraftstoffarten vor. Auch hier ist das Intervall komplett im negativen Bereich.

Geringe relative Unsicherheiten weisen die Schadstoffe CO, NO_x, SO₂ und PM bei Kerosin auf (<6 %). Etwas höher sind die Unsicherheiten für Kerosin bei NMVOC, N₂O und BC (<35 %). Die höchste relative Unsicherheit liegt bei Kerosin für Ammoniak vor (±99 %).

In TREMOD sind generell keine Methanemissionen in der Flugphase hinterlegt, sodass hierfür keine relativen Unsicherheiten angegeben werden können. Bei Messungen (siehe Abschnitt 3.3) konnten niedrigere Methankonzentrationen hinter der Turbine nachgewiesen werden als in der Luft vor dem Verdichter. Die Emissionsfaktoren aus der Monte-Carlo-Simulation liefern Werte von -0,4 bis -0,3 kg Methan pro MJ für Kerosin.

Für Flugbenzin sind die Unsicherheiten deutlich höher, da hier eine deutlich schlechtere Datenverfügbarkeit für die Schichtemissionsfaktoren vorliegt. Abgesehen von mKr liegen die relativen Unsicherheiten für Flugbenzin im Bereich von -30 bis +343 %.

Tabelle 55: Energiespezifische Emissionsfaktoren internationaler Flüge in der CCD-Phase und deren relativen Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervall)

Schadstoff	Flugbenzin, Emission in kg/TJ (TREMOD-AV 2019)	Flugbenzin, rel. Unsicherheit	Kerosin, Emission in kg/TJ (TREMOD-AV 2019)	Kerosin, rel. Unsicherheit
CH₄	0,0	[-; -] ³	0,0	[-; -] ³
NMVOC¹	465,8	[-81,8%; 221%]	4,3	[-18,8%; 18,8%]
CO	29.143,0	[-84,2%; 241,9%]	34,1	[-4,6%; 4,6%]
NO_x	81,7	[-79,8%; 206,2%]	375,6	[-4,4%; 4,4%]
mKr²	22.965,8	[-2,5%; 2,5%]	23.364,5	[-1,7%; 1,7%]
SO₂	0,5	[-30,4%; 30,4%]	19,6	[-4,9%; 4,9%]
N₂O	2,3	[-36,5%; 36,5%]	2,3	[-19%; 19%]
NH₃	0,0	[-; -] ³	4,0	[-98,9%; 98,9%]
PM⁴	3,1	[-90,1%; 309,2%]	3,6	[-6%; 6%]
BC	0,5	[-92,2%; 342,9%]	1,7	[-34,5%; 34,5%]

Anmerkung: ¹NMVOC wird gleich NMHC gesetzt und ermittelt sich aus der Differenz von HC- und CH₄-Emissionen. ²mKr entspricht dem Kehrwert des Heizwerts. ³Relative Abweichung nicht ermittelbar, da keine Indizien für CH₄ und NH₃-Emissionen bei Flugbenzin oder Kerosin vorliegen. ⁴Da alle Partikel kleiner als 2,5 µm sind, ist PM=PM₁₀=PM_{2,5}.

National

Tabelle 56 fasst die Ergebnisse für die CCD-Phase des nationalen Verkehrs zusammen. Bei mKr liegt bei beiden Kraftstoffarten dieselbe Genauigkeit wie bei den internationalen Flügen vor.

Geringe relative Unsicherheiten weisen die Schadstoffe NO_x und SO₂ bei Kerosin auf (<20 %). Etwas höher sind die Unsicherheiten bei Kerosin für N₂O, PM und BC (<45 %). Die höchsten relativen Unsicherheiten liegen bei Kerosin für NMVOC, CO und NH₃ vor. Die Bandbreiten erstrecken sich auf bis zu ±100%. Die Emissionsfaktoren für Methan aus der Monte-Carlo-Simulation liefern Werte von -2,9 bis -0,8 kg/TJ für Kerosin.

Für Flugbenzin sind die Unsicherheiten auch beim nationalen Flugverkehr deutlich höher als bei Kerosin. Die relativen Unsicherheiten für Flugbenzin liegen im Bereich von -98 bis +502 %.

Tabelle 56: Energiespezifische Emissionsfaktoren nationaler Flüge in der CCD-Phase und deren relativen Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervall)

Schadstoff	Flugbenzin, Emission in kg/TJ (TREMOD-AV 2019)	Flugbenzin, rel. Unsicherheit	Kerosin, Emission in kg/TJ (TREMOD-AV 2019)	Kerosin, rel. Unsicherheit
CH₄	0,0	[-; -] ³	0,0	[-; -] ³
NMVOC¹	578,5	[-94,7%; 395,3%]	19,4	[-52,3%; 86%]
CO	21.037,3	[-95,8%; 424,2%]	159,0	[-47,1%; 72,6%]
NO_x	142,5	[-93,6%; 370,3%]	395,6	[-18,8%; 18,8%]
mKr²	22.965,8	[-2,5%; 2,5%]	23.364,5	[-1,7%; 1,7%]
SO₂	0,5	[-39%; 39%]	19,6	[-14,8%; 14,8%]
N₂O	2,3	[-44,8%; 44,8%]	2,3	[-24%; 24%]
NH₃	0,0	[-; -] ³	4,0	[-99,7%; 99,7%]
PM⁴	2,8	[-97,3%; 472,5%]	4,4	[-32,6%; 32,6%]
BC	0,4	[-98%; 502,1%]	2,1	[-44,8%; 44,8%]

Anmerkung: ¹NMVOC wird gleich NMHC gesetzt und ermittelt sich aus der Differenz von HC- und CH₄-Emissionen. ²mKr entspricht dem Kehrwert des Heizwerts. ³Relative Abweichung nicht ermittelbar, da keine Indizien für CH₄ und NH₃-Emissionen bei Flugbenzin bzw. Kerosin vorliegen. ⁴Da alle Partikel kleiner als 2,5 µm sind, ist PM=PM₁₀=PM_{2,5}.

Verteilungsfunktionen

Bei der CCD-Phase ergeben sich dieselben Probleme bei der Bestimmung der Verteilungsfunktionen wie bei der LTO-Phase, siehe Abschnitt 3.4.1.1. Tabelle 57 gibt die zugeordneten Verteilungsfunktionen an. In Anhang B.2 sind die Histogramme mitsamt relevanter Parameter gegeben.

Tabelle 57: Zugeordnete Verteilungsfunktionen der Ergebnisse der CCD-Phase aus der Monte-Carlo-Simulation

Schadstoff	Flugbenzin international	Kerosin international	Flugbenzin national	Kerosin national
CH ₄	normal	normal	normal	normal
NMVOC	log-normal	normal	log-normal	log-normal
CO	log-normal	normal	log-normal	log-normal
NO _x	log-normal	normal	log-normal	normal
mKr	normal	normal	normal	normal
SO ₂	normal	normal	normal	normal
N ₂ O	normal	normal	normal	normal
NH ₃	-	normal	-	normal
PM	log-normal	normal	log-normal	normal
BC	log-normal	normal	log-normal	normal

3.4.2 Kraftstoffverbrauch

Die Bestimmung der Unsicherheiten des Kraftstoffverbrauchs im ZSE folgt der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Methodik. Das heißt, es gehen zum einen die in Abschnitt 3.4.1 aufgeführten bottom-up berechneten Kraftstoffverbräuche (mKr) mitsamt ihren Unsicherheiten ein, zum anderen erfolgt eine Skalierung des Gesamtverbrauchs auf den Kraftstoffabsatz, dessen Unsicherheit in Abschnitt 3.2.1 berechnet ist.

Aus der Überlagerung der Unsicherheiten ergeben sich die Werte aus Tabelle 58 für Kerosin. Mit einer Sicherheit von 95 % liegen die nationalen LTO-Emissionen für Kerosin in einem Bereich von $\pm 4,1$ % um den berichteten Wert aus TREMOD. Für die CCD-Phase bei nationalen Flügen ist die Unsicherheit für das 95%-Konfidenzintervall höher. Hier ist eine Bandbreite von rund ± 10 % anzunehmen. Die Unsicherheiten in der LTO-Phase bei internationalen Flügen liegt mit -3,7 bis +3,8 % in einer ähnlichen Größenordnung wie beim nationalen Flugverkehr.

Die kleinste relative Unsicherheit bei den berichteten Werten liegt beim internationalen Flugverkehr in der Flugphase (CCD) vor. Hier wird das Konfidenzintervall mit $\pm 1,8$ % angegeben. Diese vermeintlich höhere Genauigkeit bei der CCD-Phase international kann durch die gewählte Methodik und die Größenordnung der vier Bilanzgrenzen (LTO_{nat}, CCD_{nat}, LTO_{internat}, CCD_{internat}) erklärt werden. Die CCD-Phase international entspricht dem Absatz abzüglich der Phasen LTO_{internat}, LTO_{nat}, CCD_{nat}. Der Absatz weist zum einen nur eine geringe Unsicherheit auf (vgl. Abschnitt 3.2.1) und zum anderen ist der nationale Flugverkehr sowie die LTO-Phase international deutlich kleiner als der Absatz. Dies bedeutet, dass selbst hohe Unsicherheiten in diesen drei Phasen zwar dieselbe absolute Unsicherheit bei der Differenzberechnung für CCD_{internat} bedeuten, aber die relativen Unsicherheiten aufgrund des deutlich größeren Werts für CCD_{internat} kleiner sind. Bei der Wahl einer anderen Methodik würde sich ggf. eine andere Unsicherheit ergeben. Dazu kann man den Vergleich zum Flugbenzin herstellen. Hier wird eine prozentuale Aufteilung des Absatzes anhand der bottom-up berechneten Verbräuche aus TREMOD vorgenommen (siehe Erläuterung unten).

Tabelle 58: Kerosinverbrauch der nationalen und internationalen Flüge und deren relative Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervall) in den Flugphasen CCD und LTO

	Energieverbrauch (TREMOD-AV 2019)	Unsicherheit Minimum	Unsicherheit Maximum	Relative Unsicherheit
LTO, national (K)	8.000 TJ	7.671 TJ	8.328 TJ	[-4,1%; 4,1%]
CCD, national (K)	20.455 TJ	18.428 TJ	22.483 TJ	[-9,9%; 9,9%]
LTO, international (K)	31.439 TJ	30.270 TJ	32.640 TJ	[-3,7%; 3,8%]
CCD, international (K)	374.597 TJ	367.842 TJ	381.443 TJ	[-1,8%; 1,8%]

Anmerkung: Werte bereits auf Energiebilanz korrigiert.

Tabelle 59 zeigt die relativen Unsicherheiten für den Flugbenzinverbrauch. Allgemein sind die Unsicherheiten hier pro Phase höher als bei Kerosin. Hintergrund ist, dass die Informationen bzgl. der Flugzeugkilometer und der Basis-Emissionsfaktoren deutlich schlechter sind. Die relativen Unsicherheiten bei der LTO-Phase liegen bei rund -82 bis +223 %. Hier unterscheiden sich nationale und internationale Flüge kaum. In der CCD-Phase gibt es Unterschiede bzgl. der Relation. National beträgt die relative Unsicherheit $\pm 40\%$. International liegt die Bandbreite bei -87 bis +271 %.

Tabelle 59: Flugbenzinverbrauch der nationalen und internationalen Flüge und deren relative Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervall) in den Flugphasen CCD und LTO

	Energieverbrauch (TREMOD-AV 2019)	Unsicherheit Minimum	Unsicherheit Maximum	Relative Unsicherheit
LTO, national (BF)	37,4 TJ	6,8 TJ	120,3 TJ	[-81,8%; 221,3%]
CCD, national (BF)	256,4 TJ	161,7 TJ	351,2 TJ	[-36,9%; 36,9%]
LTO, international (BF)	1,7 TJ	0,3 TJ	5,6 TJ	[-82%; 222,6%]
CCD, international (BF)	23,4 TJ	3,0 TJ	86,8 TJ	[-87%; 271%]

Anmerkung: Werte bereits auf Energiebilanz korrigiert.

Die zugeordneten Verteilungsfunktionen für die Unsicherheiten der Kraftstoffverbrauchswerte finden sich in nachstehender Tabelle 60 wider. Der LTO- und CCD-Flugphasen mit dem Treibstoff Kerosin, sowie die nationalen CCD-Phasen bei Flugbenzin werden Normalverteilungen, die übrigen Log-Normalverteilungen zugeordnet.

Tabelle 60: Zugeordnete Verteilungsfunktionen der Ergebnisse Treibstoffverbrauchs aus der Monte-Carlo-Simulation

	Flugbenzin	Kerosin
National – LTO	log-normal	normal
National – CCD	normal	normal
International – LTO	log-normal	log-normal
International – CCD	log-normal	log-normal

Bezieht man die Verbräuche der nationalen bzw. internationalen Flüge nach Energiebilanzkorrektur auf den Gesamtabsatz, so erhält man die sogenannten „Splitfaktoren“. Die folgende Tabelle gibt den TREMOD-Mittelwert sowie die untere und obere Grenze an.

Tabelle 61: Bandbreite der Unsicherheiten der Splitfaktoren aus der Monte-Carlo-Simulation

	TREMOT	U_{\min}	U_{\max}	Verteilfunktion
national: Flugbenzin	0,914	0,765 (-16%)	1,062 (+16%)	normal
national: Kerosin	0,065	0,060 (-7%)	0,070 (+7%)	log-normal
international: Flugbenzin	0,078	0,011 (-86%)	0,283 (+262%)	log-normal
international: Kerosin	0,928	0,915 (-1%)	0,942 (+1%)	normal

Anmerkung: Die Splitfaktoren werden im ZSE verwendet, um den Absatz auf die Relationen (national, international) aufzuteilen.

Im ZSE werden analog zu den Splitfaktoren auch die Phasen (LTO, CCD) relativ und nicht absolut angegeben. Hier werden für nationale und internationale Flüge getrennt die Verbräuche pro Phasen ins Verhältnis zum Gesamtverbrauch gesetzt. Die Berechnung erfolgt nach Durchführung der Energiebilanzkorrektur. Tabelle 62 fasst die Bandbreite der Unsicherheiten zusammen.

Tabelle 62: Bandbreite der Unsicherheiten der LTO-Anteile am Verbrauch getrennt nach Relation

	TREMOT	U_{\min}	U_{\max}	Verteilfunktion
national: Flugbenzin	0,127	0,019 (-85%)	0,446 (+250%)	log-normal
national: Kerosin	0,281	0,260 (-7%)	0,303 (+8%)	log-normal
international: Flugbenzin	0,069	0,018 (-74%)	0,187 (+171%)	log-normal
international: Kerosin	0,077	0,075 (-3%)	0,080 (+3%)	normal

Anmerkung: Die LTO-Anteile werden im ZSE verwendet, um den Absatz pro Relationen (national, international) auf die Phasen (LTO, CCD) aufzuteilen.

4 Fazit und Ausblicke

4.1 Straßenverkehr

Im Folgenden werden die Resultate durchleuchtet und Schlussfolgerungen gezogen. Zudem werden im Anschluss Vergleiche zu anderen Studien hergestellt. Abschließend erfolgt eine kritische Würdigung der verwendeten Methodik und Annahmen.

In den Resultaten der vorliegenden Studie können Regelmäßigkeiten festgestellt werden, die zu folgenden Schlüssen führen:

- ▶ Allgemein können die absoluten Treibhausgasemissionen relativ präzise ermittelt werden. Dies kann dadurch begründet werden, dass die THG des Straßenverkehrs fast ausschließlich aus CO₂-Emissionen bestehen und hier die relativen Unsicherheiten der kraftstoffbezogenen Emissionsfaktoren gering sind.
- ▶ Da die Berechnung der absoluten Emissionen anhand des Kraftstoffabsatz vorgenommen wird und die Erfassung des Absatzes relativ genau ist, ist auch bei den absoluten THG-Emissionen eine hohe Genauigkeit gegeben. Zu beachten ist jedoch, dass hier Aspekte wie der Grauimport von Kraftstoffen nicht berücksichtigt werden und daher die real in Deutschland anfallenden Emissionen des Verkehrs von den Emissionen im ZSE abweichen. Wie die Resultate der Unsicherheitenanalyse zeigen, weisen die Schadstoffemissionen im Vergleich zu den Treibhausgasen deutlich höhere Unsicherheiten auf.
- ▶ Der Einfluss der Desaggregation (welche die Unsicherheit tendenziell erhöht) und Aggregation (welche die Unsicherheit generell senkt), sowie von Faktoren, die erst gegen Ende der Berechnungskette einfließen und deren Unsicherheiten daher nur von wenigen weiteren Berechnungsschritten verwischt werden, konnte demonstriert werden (siehe z. B. Kapitel 2.2.2.2 oder 2.4.3.1.1). Dies impliziert, dass die hier präsentierten Resultate nur indirekt in anderen Kontexten weiterverwendet werden können: Die Aggregationsebene des ZSE beispielsweise, auf welche sich die finalen Unsicherheiten beziehen, wird nur im internationalen Klimagas- und Luftschatstoffreporting unter den UNFCCC- bzw. CLRTAP-Konventionen verwendet; auch die Schichtemissionsfaktoren werden wohl nur in Ausnahmefällen ohne Alterungs-, Temperatur oder Effizienzkorrektur verwendet. Und die Unsicherheiten der Aktivitätsraten, welche bei Aggregationen zwingend als Gewicht einfließen müssen, würden in anderen Kontexten mutmaßlich sehr unterschiedlich ausfallen. Dies bedeutet, dass bei der Weiterverwendung von Resultaten aus der vorliegenden Studie die Fehlerfortpflanzung bis zum jeweils finalen Resultat berücksichtigt werden muss (idealerweise mittels Monte Carlo-Simulation, da die meisten Variablen nicht normalverteilt sind) – oder die Resultate aus der vorliegenden Studie als indikative Werte deklariert werden müssen.
- ▶ Damit in Zusammenhang steht, dass sich die Unsicherheitsverteilungen über mehrere Rechenschritte hinweg «normalisieren», sodass sie auf der finalen ZSE-Ebene (bzw. generell höheren Aggregationsebenen) in der Regel log-normalverteilt sind. Dies deckt sich mit den Hinweisen des EMEP-EEA-Guidebooks (Ntziachristos und Samaras 2019). Die korrekte Schätzung der Input-Unsicherheitsverteilungen (z. B. asymmetrisches Dreieck oder Gleichverteilung anstelle Normalverteilung, wenn sehr wenige vorhandenen Inputwerte auf erstere hindeuten) ist trotzdem sehr wichtig, da sie die Lage der finalen 95%-Konfidenzintervallgrenzen mit beeinflussen.

- ▶ Neuere Emissionsstandards wiesen oft höhere relative Unsicherheiten auf. Gründe dafür sind:
 - niedrige absolute Emissionswerte führen i. d. R. zu hoher relativer Messunsicherheit;
 - Es liegt erst eine kleine Stichprobe an gemessenen Fahrzeugen vor;
 - teilweise müssen Korrekturfaktoren mit hoher Unsicherheit angewendet werden (z. B. Alterung und Temperatureinfluss bei Diesel-Pkw).
- ▶ Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:
 - Es sollten mehr Fahrzeuge der neuen Fahrzeugschichten (insb. Euro 6d) vermessen werden. Dies geschieht normalerweise auch in späteren Messkampagnen.
 - Für Kaltstartemissionen sind deutlich geringere Stichproben als für die betriebswarmen Emissionen verfügbar, da das Kaltstartmodell umfangreiche Tests bei verschiedenen Starttemperaturen verlangt. Hier wird eine Erweiterung des Ansatzes empfohlen mit der auch PEMS Messdaten zur Parametrierung der Kaltstartemissionen nutzbar gemacht werden.
 - Es sollten mehr Messungen an unterschiedlich alten Fahrzeugen und bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt werden. Dazu eignen sich Remote Sensing und PEMS, wobei ersteres zwar eine große Anzahl Messungen generieren kann, welche dann aber sehr vorsichtig interpretiert werden müssen, weil sich mehrere Einflüsse überlagern können. Für Einzelfahrzeugmessungen stellen hingegen die begrenzten Ressourcen und die Verfügbarkeit zu messender Fahrzeuge eine Limitation dar.
 - Die hohe relative Unsicherheit bei niedrigen absolut gemessenen Emissionen hat aber im Umkehrschluss den Vorteil, dass sich auch der Schwankungsbereich absolut gesehen auf niedrigem Niveau bewegt.

Die Größenordnungen der hergeleiteten Unsicherheiten erscheinen im Vergleich zu anderen verfügbaren Studien plausibel, auch wenn eine Vergleichbarkeit in vielen Fällen nur eingeschränkt gegeben ist: Z. B. können aufgrund des Einflusses der Aggregationsebene nur Unsicherheiten auf gleicher oder ähnlicher Aggregationsebene verglichen werden; auch der Einfluss der Datenlage auf die Unsicherheit, welche je nach Emissionsklasse oder auch Land unterschiedlich ausfällt, erschwert die Vergleichbarkeit. Folgende Vergleiche mit anderen Studien können angestellt werden:

- ▶ Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren der Fahrzeuge bis Emissionsklasse Euro-4/IV können teilweise mit der Vorgängerstudie ((Knörr et al. 2009)) verglichen werden. Die Aggregationsebene stimmt allerdings nur für die Pre Euro-Fahrzeuge (Emissionsklasse „konventionell“) mit der aktuellen Studie überein, da das ZSE damals nicht Euro-Stufen unterschied, sondern nur zwischen „konventionell“ und „Minderungstechnik“ (d. h. Euro-1/I bis -4/IV). Das heißt, die Unsicherheiten der Euro-1/I bis -4/IV-Fahrzeuge waren in der Vorgängerstudie stärker aggregiert, was rein aufgrund der Aggregation eine niedrigere Unsicherheit erwarten lässt.
- Generell liegen sowohl die Unsicherheiten der Aktivitätsraten (Tabelle 63) als auch der Emissionsfaktoren (Tabelle 64) für diese (bedingt) vergleichbaren Kategorien in einer ähnlichen Größenordnung wie in der Vorgängerstudie. Bei den Fahrzeugen ohne Minderungstechnik liegen sie aktuell etwas niedriger, bei den Euro-1/I bis -4/IV-Fahrzeugen

etwas höher – was aber wie erwähnt an der unterschiedlichen Aggregationsstufe liegen kann.

Es kann aber sicherlich konstatiert werden, dass die aktuelle Analyse die Berechnung der Unsicherheiten der ZSE-Aktivitätsraten und -Emissionsfaktoren deutlich präziser gemacht hat als im Vorgängerprojekt. Aktuell wurden die Unsicherheiten für alle Fahrzeugkategorien, Emissionskategorien (warm, Kaltstart, Verdampfung) und eine größere Auswahl an Schadstoffen quantitativ basierend auf den vorliegenden Inputdaten analysiert, ohne wie die Vorgängerstudie für gewisse Bereiche auf Analogieschlüsse zurückzugreifen. Auch wurde die Entwicklung der Unsicherheiten über die gesamte Modellkette analysiert, anstatt wie die Vorgängerstudie die Zerlegung bis auf Ebene Subsegment/Verkehrssituation und anschließende Aggregation auf ZSE-Ebene auszublenden und hinsichtlich Unsicherheiten als neutral (netto-Null-Effekt) anzunehmen. Zudem wurden die Monte-Carlo-Berechnungen aktuell „aus einem Guss“ durchgeführt, d. h. mit der gleichen Auswahl an Zufallswerten für die gesamte Berechnungskette der Emissionen, während die Monte-Carlo-Simulationen in der Vorstudie gemäß Beschreibung schrittweise, d. h. für jede Aggregationsebene einzeln, durchgeführt wurden und somit die Abhängigkeit der Zufallsvariablen zwischen den verschiedenen Ebenen möglicherweise ignoriert wurde.

- Das EMEP-/EEA-Emission Inventory Guidebook enthält sogenannte «Uncertainty Ratings», welche mit zunehmender Unsicherheit in Buchstaben A-E ausgedrückt werden und denen ein typischer Fehlerbereich zugeordnet ist, der mit dem 95%-Konfidenzintervall vergleichbar ist. Für einen Teil der nicht-regulierten Schadstoffe und die Verdunstungsemissionen entstammen auch die hier verwendeten Inputs diesen «Uncertainty Ratings» (siehe Kapitel 2.3.2 und 2.3.3); für betriebswarmen Emissionen der regulierten Schadstoffe sind die hier präseierten Resultate jedoch unabhängig davon und können grundsätzlich verglichen werden. Allerdings ist der Vergleich auch hier eingeschränkt, denn einerseits macht das Guidebook keine explizite Angabe, für welche Aggregationsebene die angegebenen Ratings gelten; und andererseits sind die Angaben nicht widerspruchsfrei: So werden im Road-Transport-Kapitel ((Ntziachristos und Samaras 2019), Tab. 4-1) alle regulierten Schadstoffe für die mengenmäßig relevanten Fahrzeugkategorien und Technologien mit Rating «A» eingestuft, während im Uncertainty-Kapitel ((EMEP/EEA 2019), Tab. 2-3) Rating «C» angegeben wird. Rating «A» liegt mit einer Unsicherheit von 10 bis 30 % mehrheitlich unterhalb der hier berechneten Werte, «C» hingegen mit 50 bis 200 % mehrheitlich oberhalb. Würden die Ratings aber gemäß ihrer textlichen Beschreibung differenziert auf die einzelnen ZSE-Kategorien angewendet, so würden sie mehrheitlich passen: Emissionsfaktoren basierend auf Messwerten, welche «die gesamten Betriebsbedingungen gut abdecken», erhalten auch in der vorliegenden Studie niedrigere Unsicherheiten im Bereich von 10 bis 30 %, während sie höhere Unsicherheiten aufweisen, je geringer der Anteil der durch Messungen abgedeckten Bedingungen wird.

Tabelle 63: Vergleich der Unsicherheit der ZSE-Aktivitätsraten für Diesel- und Otto-Pkw und Diesel-SNF (bis Euro-4/IV) mit dem Vorgängerbericht

Fahrzeug-kategorie	Kraft-stoff	Emissionsklasse Vorgängerbericht	Straßen-kategorie	U95% (UG) aktuell	U95% (OG) aktuell	U95% (Vorgänger-bericht)
Pkw	Benzin	MT (Euro 1/I - 4/IV)	Autobahn	22% - 16%	18% - 26%	28%
Pkw	Benzin	MT (Euro 1/I - 4/IV)	außerorts	30% - 22%	26% - 38%	22%
Pkw	Benzin	MT (Euro 1/I - 4/IV)	innerorts	41% - 29%	37% - 58%	39%
Pkw	Benzin	Konventionell	Autobahn	-14%	16%	35%
Pkw	Benzin	Konventionell	außerorts	-19%	22%	35%
Pkw	Benzin	Konventionell	innerorts	-25%	31%	62%
Pkw	Diesel	MT (Euro 1/I - 4/IV)	Autobahn	22% - 20%	24% - 27%	31%
Pkw	Diesel	MT (Euro 1/I - 4/IV)	außerorts	30% - 28%	36% - 39%	27%
Pkw	Diesel	MT (Euro 1/I - 4/IV)	innerorts	40% - 39%	55% - 58%	42%
Pkw	Diesel	Konventionell	Autobahn	-19%	23%	50%
Pkw	Diesel	Konventionell	außerorts	-27%	34%	50%
Pkw	Diesel	Konventionell	innerorts	-37%	51%	59%
SNF	Diesel	MT (Euro 1/I - 4/IV)	Autobahn	28% - 24%	29% - 35%	17%
SNF	Diesel	MT (Euro 1/I - 4/IV)	außerorts	24% - 22%	27% - 29%	19%
SNF	Diesel	MT (Euro 1/I - 4/IV)	innerorts	28% - 24%	29% - 35%	36%
SNF	Diesel	Konventionell	Autobahn	-22%	27%	18%
SNF	Diesel	Konventionell	außerorts	-23%	27%	20%
SNF	Diesel	Konventionell	innerorts	-28%	35%	36%

Tabelle 64: Vergleich der Unsicherheit der ZSE-NO_x-Emissionsfaktoren für Diesel- und Otto-Pkw (bis Euro-4/IV) mit dem Vorgängerbericht

Fahrzeug-kategorie	Kraft-stoff	Emissionsklasse Vorgängerbericht	Straßen-kategorie	U95% (UG) aktuell	U95% (OG) aktuell	U95% (Vorgänger-bericht)
Pkw	Benzin	MT (Euro 1/I - 4/IV)	Autobahn	34% - 32%	42% - 46%	90%
Pkw	Benzin	MT (Euro 1/I - 4/IV)	außerorts	32% - 29%	36% - 42%	55%
Pkw	Benzin	MT (Euro 1/I - 4/IV)	innerorts	36% - 28%	36% - 49%	50%
Pkw	Benzin	Konventionell	Autobahn	18%	20%	43%
Pkw	Benzin	Konventionell	außerorts	18%	20%	49%
Pkw	Benzin	Konventionell	innerorts	17%	20%	48%
Pkw	Diesel	MT (Euro 1/I - 4/IV)	Autobahn	48% - 22%	26% - 74%	25%
Pkw	Diesel	MT (Euro 1/I - 4/IV)	außerorts	48% - 21%	25% - 76%	28%
Pkw	Diesel	MT (Euro 1/I - 4/IV)	innerorts	45% - 20%	24% - 68%	13%
Pkw	Diesel	Konventionell	Autobahn	21%	25%	28%
Pkw	Diesel	Konventionell	außerorts	21%	25%	28%
Pkw	Diesel	Konventionell	innerorts	21%	25%	35%

Anmerkung: Die Unsicherheit der Emissionsfaktoren wird in der Vorgängerstudie leider nicht auf vergleichbarer Aggregationsebene ausgewiesen; daher kann enthält diese Tabelle nur einen Vergleich für Pkw und nicht für SNF.

Obwohl eine Vielzahl an unterschiedlichen Faktoren in der Analyse berücksichtigt wurden, konnten einige Aspekte nur unzureichend oder gar nicht in die Betrachtung miteinbezogen werden:

- ▶ Für diejenigen Schadstoffe und Fahrzeugschichten, die nicht auf Messdaten aus der DBEFA beruhen – dies betrifft z. B. die aus den EMEP-EEA-Guidebooks übernommenen Schadstoffe N₂O und NH₃ (mit Ausnahme einiger neuerer Fahrzeugschichten) oder die Verdunstung – ist die Datenlage zu Unsicherheits-Inputs dünn. Die in diesen Fällen bspw. verwendeten «Precision indicators» aus EMEP/EEA ((Ntziachristos und Samaras 2019), (Mellios et al. 2019)) weisen selbst eine hohe Bandbreite auf, und es ist nirgends explizit festgehalten, auf welche Aggregationsebene sie sich beziehen (siehe Kapitel 2.3.2 und 2.3.3). Sie sind auch nicht für alle Fahrzeugschichten vorhanden, weswegen für bestimmte Fahrzeugschichten (z. B. Gasfahrzeuge) auf Analogieschlüsse zurückgegriffen werden musste. Interpretationen der Resultate von z. B. Gasfahrzeugen und Vergleiche mit anderen Fahrzeugschichten sind bei Fahrzeugen mit Analogieschlüssen daher nicht sinnvoll.
- ▶ Die Analyse wurde nur mit den Aktivitätsdaten von 2019 durchgeführt. Somit gelten die ermittelten finalen Unsicherheiten für das Jahr 2019. Werden sie für andere Jahre angewendet, so sollten sie als indikative Werte verstanden werden, denn in anderen Jahren verschieben sich die Gewichte der einfließenden Input-Unsicherheiten. Denn sobald grundlegende Modellanpassungen (methodisch und/oder datenseitig) durchgeführt werden, ändert sich die Berechnung und die Ergebnisse der Emissionsmodellierung. Zwar wird dieses Problem durch die Verwendung relativer Unsicherheiten statt absoluter Unsicherheiten reduziert, jedoch kann bei einer besseren Datenlage und -implementierung,

bspw. von Emissionsfaktoren von Euro 6d-Fahrzeugen, eine höhere Genauigkeit erzielt werden. Auch können Verbesserungen bei der Datenerhebung der Fahrleistung (z. B. Einführung einer fahrleistungsbezogenen Pkw-Maut oder umfassendere Zählstellen) dazu führen, dass die berechneten Unsicherheiten nicht auf die folgenden Jahre übertragbar sind.

- ▶ Wie im vorangegangenen Punkt erwähnt, ist eine Übertragbarkeit der Unsicherheiten allgemein problematisch. Zu unterstreichen ist dieser Aspekt insbesondere bei neuen Fahrzeugtechnologien, deren aktueller Einsatz vom künftigen Einsatz abweichen kann. Hier sind insbesondere BEV und PHEV zu erwähnen. Aufgrund der im Jahr 2019 begrenzten Reichweite von BEV lag die Jahresfahrleistung deutlich geringer als von Otto-Fahrzeugen. Da erwartet wird, dass BEV künftig vor allem Otto-Fahrzeuge ersetzen werden, wird sich auch die Jahresfahrleistung pro Fahrzeug erhöhen. Auch weisen z. B. durch Fehlanreize PHEV geringe elektrische Fahranteile auf. Diese könnten sich künftig deutlich erhöhen. Modellseitig würden sich daher die Größen (Jahresfahrleistung, elektrischer Fahranteil) ggü. den Werten des Jahres 2019 deutlich ändern. Dies würde auch in einer Änderung der Unsicherheiten resultieren. Zudem werden bei kommenden Updates des HBEFA auch neue Messdaten berücksichtigt, sodass die Unsicherheit der betroffenen, jungen Emissionsklassen jeweils abnimmt.
- ▶ Bisher unzureichend berücksichtigt sind Unsicherheiten, die durch Annahmen und Festlegungen bei der Modellierungsmethodik entstehen. So beruht bspw. die Aufteilung von Lkw auf Solo-Lkw und Lastzug auf lange bestehenden Annahmen, die nur schwer zu validieren sind. Zudem konnten die Unsicherheiten der Fahrleistungen anhand der Fahrleistungserhebung 2014 abgeschätzt werden, jedoch gehen neben dieser Quelle auch weitere Quellen und Annahmen in die Berechnung der Fahrleistung in TREMOD ein. Die Unsicherheiten, die durch diese Komposition von Quellen und Annahmen entstehen können kaum beziffert werden und können von den verwendeten Werten in der Unsicherheitenanalyse abweichen.
- ▶ Die in TREMOD verwendeten absoluten Fahrleistungen und das Bestandsgerüst passen strenggenommen nur begrenzt zusammen. Die Fahrleistung umfasst die gesamten gefahrenen Kilometer auf dem Bundesgebiet. Demnach sind auch Fahrten von ausländischen Fahrzeugen enthalten. Demgegenüber setzt sich das Bestandsgerüst aus Fahrzeugen zusammen, die in Deutschland zugelassen sind. Die Emissionsfaktoren der Fahrzeuge werden demnach ausschließlich über die Deutsche Fahrzeugflotte determiniert. Problematisch könnte dies bei SNF sein, denn ausländische Fahrzeuge (z. B. aus Polen oder den Baltischen Ländern) sind vermutlich im Schnitt älter als deutsche Fahrzeuge und weisen somit höhere Emissionsfaktoren auf. Dieser Aspekt bleibt unberücksichtigt.
- ▶ Problematisch ist auch die verwendete Methodik für die Energiebilanzkorrektur. Diese hat einen großen Einfluss auf das Ergebnis, jedoch ist es kaum möglich, ihre Genauigkeit zu bestimmen. So wird, ausgehend von dem Verhältnis Absatz Ottokraftstoff zu errechnetem Verbrauch, der Korrekturfaktor für Otto-Pkw bestimmt und für die weitere Berechnung für Diesel-Pkw übernommen. Jedoch könnte diese Annahme aufgrund des bspw. unterschiedlichen Graumarkts nicht korrekt sein bzw. zwischen den Jahren variieren. Würde man z. B. den Absatz anhand der Verbräuche pro Fahrzeugkategorie prozentual aufteilen, so würde sich ein anderes Bild ergeben als bei der verwendeten Energiebilanzkorrektur.
- ▶ Des Weiteren werden aktuell einige Einflüsse auf Emissionen (noch) nicht berücksichtigt. In der Vergangenheit haben Modellerweiterungen und -verbesserungen überwiegend eine

Erhöhung der Emissionen bewirkt, sobald bis dahin nicht betrachtete Einflüsse berücksichtigt wurden. Beispiele sind die Katalysatoralterung, die Temperatureinflüsse oder die Realverbrauchskorrektur; eine Ausnahme stellt die Berücksichtigung der Alterung beim NO₂/NO_x-Verhältnis dar, welche mit der HBEFA-Version 4.2 zu einer Senkung der NO₂-Emissionsfaktoren geführt hat.

Aktuell stellen die Kaltstartemissionen der schweren Nutzfahrzeuge einen Einfluss dar, der noch nicht berücksichtigt ist, sich aber erhöhend auf die Emissionen auswirken könnte. Mangels quantitativer Daten konnte er in der vorliegenden Unsicherheitenanalyse nicht berücksichtigt werden. Es ist auch nicht auszuschließen, dass weitere, bisher unbekannte Einflüsse die Emissionsraten beeinflussen.

- ▶ Die Unsicherheiten einiger Eingangsgrößen können nicht oder nur schwer abgeschätzt werden. Hier sind vor allem die Unsicherheiten der Verteilung der Verkehrssituationen zu nennen. Diese ist nur mit großem Aufwand zu bestimmen und wird bei der kommenden TREMOD-Version nach über 20 Jahren aktualisiert. Eine Unsicherheit ist hierfür nicht gegeben. Es wurde daher eine pauschale relative Unsicherheit für jede Verkehrssituation angenommen, jedoch handelt es sich hier lediglich um eine Expertenschätzung. Andere Größen mussten ebenfalls geschätzt werden und basieren demnach auf keiner fundierten Ableitung der Unsicherheiten.

Zukünftige Updates der Emissionsfaktoren und Aktivitätsdaten werden Hinweise liefern, wie zutreffend die hier berechneten Unsicherheiten sind, indem dann geprüft werden kann, ob deren Werte innerhalb der hier genannten 95%-Konfidenzintervalle liegen.

4.2 Flugverkehr

Die über das ZSE für den zivilen Flugverkehr bereitgestellten Verbräuche und Emissionen unterliegen Unsicherheiten, die aufgrund der Modellierung, Verkehrsdaten und Emissionsfaktoren entstehen können. Da sich die Berechnungen der Verbräuche und Emissionen einerseits hinsichtlich der Modellierung, Datenqualität und-verfügbarkeit unterscheiden, sowie andererseits Unterschiede in den Bandbreiten möglicher Ausgangswerte zur Emissionsberechnung vorliegen, fallen ihre Unsicherheiten verschieden hoch aus.

Allgemein ist die Bilanzierung bei Flugbenzin höheren Unsicherheiten unterworfen, da insbesondere hier keine hinreichenden Informationen bzgl. der Flugkilometer und der eingesetzten Flugzeugtypen vorliegen. Da der Anteil der aus der Verbrennung von Flugbenzin resultierenden Emissionen an den Gesamtmengen deutlich kleiner ist als der von Kerosin, haben diese hohen Unsicherheiten aber keine große Auswirkung auf die Unsicherheit der Gesamtemissionen des zivilen Luftverkehrs.

Beim Flugbetrieb mit Kerosin sind die relativen Unsicherheiten zwar geringer, jedoch sind bei einigen Schadstoffen die Quantifizierungen äußerst schwierig, wie Tabelle 65 zeigt.

Tabelle 65: Emissionsfaktoren und Energieverbrauch sowie deren relativen Unsicherheiten (95%-Konfidenzintervall) – Kerosin

Schadstoff	CCD – national	LTO – national	CCD – international	LTO - international
Energie	20.455 TJ [-9,9%; 9,9%]	8.000 TJ [-4,1%; 4,1%]	374.597 TJ [-1,8%; 1,8%]	31.439 TJ [-3,7%; 3,8%]
CH₄⁽³⁾	0 kg/TJ [-; -]	10,153 kg/TJ [-50,6%; 81,4%]	0 kg/TJ [-; -]	4,847 kg/TJ [-26,8%; 26,8%]
NMVOC	19,391 kg/TJ [-52,3%; 86%]	40,613 kg/TJ [-44,4%; 66,4%]	4,265 kg/TJ [-18,8%; 18,8%]	19,387 kg/TJ [-17,9%; 20,6%]
CO	158,999 kg/TJ [-47,1%; 72,6%]	267,567 kg/TJ [-26%; 26%]	34,081 kg/TJ [-4,6%; 4,6%]	186,871 kg/TJ [-6,3%; 6,6%]
NO_x	395,573 kg/TJ [-18,8%; 18,8%]	311,745 kg/TJ [-7,9%; 7,9%]	375,622 kg/TJ [-4,4%; 4,4%]	358,193 kg/TJ [-5,5%; 5,5%]
SO₂	19,626 kg/TJ [-14,8%; 14,8%]	19,626 kg/TJ [-8,9%; 8,9%]	19,626 kg/TJ [-4,9%; 4,9%]	19,626 kg/TJ [-6,7%; 6,7%]
N₂O	2,336 kg/TJ [-24%; 24%]	2,804 kg/TJ [-38%; 38%]	2,336 kg/TJ [-19%; 19%]	2,103 kg/TJ [-9,4%; 9,4%]
NH₃	3,972 kg/TJ [-99,7%; 99,7%]	3,972 kg/TJ [-99,2%; 99,2%]	3,972 kg/TJ [-98,9%; 98,9%]	3,972 kg/TJ [-99%; 99%]
PM²	4,448 kg/TJ [-32,6%; 32,6%]	3,048 kg/TJ [-15,5%; 15,5%]	3,609 kg/TJ [-6%; 6%]	2,253 kg/TJ [-7%; 7%]
BC⁽¹⁾	2,135 kg/TJ [-44,8%; 44,8%]	1,463 kg/TJ [-36,7%; 36,7%]	1,732 kg/TJ [-34,5%; 34,5%]	1,082 kg/TJ [-34,8%; 34,8%]

Anmerkung: Diese Werte werden ins ZSE übernommen. ¹Werte werden auf 0 gesetzt, siehe Abschnitt 3.4.1.

²PM=PM₁₀=PM_{2,5}, da alle Partikel kleiner als 2,5 µm sind. ³Es können keine relativen Unsicherheiten für die CCD-Phase ermittelt werden, weil der Basiswert 0 beträgt. Absolute Unsicherheiten können jedoch bestehen.

Einerseits weist der für den Nationalen Inventarbericht relevante Energieverbrauch der nationalen Flüge eine verhältnismäßig niedrige Unsicherheit von ungefähr ±8 % auf. Bei Einordnung in das „Precision Rating“ der EMEP/EEA wäre dies die Stufe A (EMEP/EEA 2019). Andererseits ist die Genauigkeit bei der Ermittlung der Schadstoffe NMVOC und CO gering (ca. -52% bis +86 % relative Abweichung möglich, Stufe C). Eine hohe relative Unsicherheit haben ebenfalls nationale NH₃, PM- und BC-Emissionen. Diese können in einem Bereich von bis zu ±100 % eingeordnet werden (Stufe C). Die nationalen NO_x-, SO₂- und N₂O-Emissionen weisen eine Unsicherheit im Bereich von 10-40 % auf (Stufe A-B).

Der gesamte Energieverbrauch der internationalen Flüge weist eine Unsicherheit von ungefähr ±2 % auf. BC sowie NMVOC können mit einer Genauigkeit von unter ±35 % ermittelt werden, wobei NH₃ mit ±99 % am ungenauesten bestimmt werden kann. Die internationalen CO-, NO_x-, SO₂- und N₂O- und PM-Emissionen weisen eine Unsicherheit im Bereich von 5-10 % auf (alle Stufe A). Relativ erscheinen die internationalen Flugemissionen zwar genauer bestimbar zu sein, allerdings ist ihr Anteil an den Gesamtemissionen des zivilen Luftverkehrs deutlich höher, sodass die Unsicherheiten der absoluten Emissionsmengen größer sind als beim nationalen Flugverkehr.

Im Rahmen der Unsicherheitenanalyse konnten einige Erkenntnisse gewonnen werden, die kritische Aspekte der Eingangsdaten und der Modellannahmen für TREMOD-AV offenlegen.

Diese werden im Folgenden diskutiert und mögliche Auswirkung auf die weitere Weiterentwicklung von TREMOD dargelegt.

Ein Aspekt ist die verwendete Methode, um den Energieabsatz auf Relation (national, international) und Phase (LTO, CCD) aufzuteilen. Würde hier eine andere Methode angewandt werden, so ergäbe sich auch eine andere Aufteilung. Zum Beispiel hätte eine prozentuale Aufteilung des Absatzes anhand der prozentualen Anteile der bottom-up berechneten Verbräuche bei Kerosin (analog der Methodik bei Flugbenzin) die Änderungen aus Tabelle 66 zur Folge.

Tabelle 66: Auswirkung der verwendeten Methode auf Energieverbrauch Flugverkehr Kerosin

Relation	Phase	Aktuelle Methode ¹	Prozentuale Aufteilung	Änderung
National	LTO	8.078 TJ	8.515 TJ	+5,4%
National	CCD	20.735 TJ	21.856 TJ	+5,4%
International	LTO	31.715 TJ	33.429 TJ	+5,4%
International	CCD	373.961 TJ	370.689 TJ	-0,9%
Absatz		434.489 TJ	434.489 TJ	

Anmerkungen: ¹Für Kerosin verwendete Methodik siehe Abschnitt 3.1. ²Bei der prozentualen Aufteilung werden die vier nach Relation und Phase berechneten Verbräuche errechnet und ins Verhältnis zum Gesamtverbrauch gesetzt. Die hieraus errechneten Anteile werden mit dem Absatz multipliziert.

Es wird ersichtlich, dass die angewandte Methode einen großen Einfluss auf die Aufteilung und somit auf die nationalen Inventare hat. Da eine Integration der Unsicherheit der verwendeten Methode in die Analyse problematisch ist, wurde dieser Aspekt nicht weiter durchleuchtet. Jedoch wäre eine Überprüfung der Methode durchaus sinnvoll.

Aufgrund des hohen Aufwands einer Unsicherheitenanalyse wird diese nicht jährlich durchgeführt. Problematisch ist es allerdings, die relativen Unsicherheiten für andere Jahre als das Betrachtungsjahr anzunehmen. Zwar können diese als Abschätzung verwendet werden, jedoch unterscheiden sich die Jahre bzgl. einer Vielzahl von Eingangsparametern, die wiederum einen Einfluss auf die Unsicherheiten haben.

So unterscheidet sich bspw. die Datenbasis für die Emissionsfaktoren zwischen den Flugzeugtypen: Es könnte sein, dass in einem Jahr tendenziell mehr Flugzeugtypen starten, die durch eine gute Datenbasis gekennzeichnet sind. In diesem Fall könnte die gesamte Unsicherheit niedriger ausfallen. Große Änderungen z. B. bei der Flottenzusammensetzung zwischen den Jahren sind in einem kurzen Zeitraum nicht zu erwarten, sodass eine Übertragung der relativen Unsicherheiten durchaus gute Abschätzungen liefern kann, jedoch ist bei Extremereignissen (bspw. COVID-Pandemie) oder bei einem zu großen zeitlichen Abstand des Betrachtungs- zum Analysejahr der Unsicherheitenermittlung die Verwendung mit größeren Ungenauigkeiten verbunden.

Da bei der Unsicherheitenanalyse eine umfassende Recherche und Überprüfung sämtlicher Eingangsgrößen durchgeführt wurde, konnten die aktuellen Annahmen in TREMOD hinterfragt werden. Ein Großteil ist weiterhin plausibel, aber es wurden auch einige Parameter identifiziert, die zu überprüfen wären. Zu nennen sind hier insb. die Flugeffizienz (Umweg), der Heizwert und einige Emissionsfaktoren (z. B. NH₃). Bei allen Größen konnten systematische Abweichungen zu

den Literaturwerten beobachtet werden bzw. sie liegen an Extrema der bekannten realistischen Bandbreiten, spiegeln aber zugleich nicht den wahrscheinlichsten Wert wider.

Die Flugeffizienz beruht auf Annahmen, die bereits knapp zehn Jahre alt sind. Seitdem hat der Flugverkehr deutlich zugenommen und ist somit auch der Flugraum enger geworden. Dies könnte eine geringere Flugeffizienz bewirkt haben. Auch temporäre Ereignisse, etwa Flugverbotszonen (wie aktuell über der Ukraine), haben Einfluss auf die tatsächlichen Flugdistanzen. Eine Anpassung der TREMOD-Annahmen (Erhöhung des Umwegs) wäre daher sinnvoll und perspektivisch eine jährliche Anpassung des Umwegs für Relationsgruppen, zusammengefasst nach bestimmten Ziel- bzw. Herkunftsregionen, denkbar. Generell konnte festgestellt werden, dass die in TREMOD-AV angenommene Flugeffizienz verglichen zu anderen Quellen durchweg höher angenommen wird (kürzerer Umweg).

Der verwendete Heizwert für Kerosin in TREMOD liegt an der unteren Grenze der in der Literatur gegebenen Werte. Da der Heizwert jedoch sowohl auf die Aufteilung des Kraftstoffabsatzes als auch auf die energiespezifischen Emissionsfaktoren einen großen Einfluss hat, ist zu überprüfen, inwiefern eine Anpassung sinnvoll sein könnte.

Einige Emissionsfaktoren könnten veraltet sein. So zeigt die Unsicherheitenanalyse z. B. für NH₃, dass der TREMOD-Wert außerhalb der errechneten Unsicherheitenbandbreite liegt. Zwar haben auch andere Faktoren wie bspw. der Heizwert einen Einfluss hierauf, allerdings finden sich sehr unterschiedliche Faktoren in der Literatur, sodass einige Faktoren in TREMOD veraltet sein könnten. Dies wäre in regelmäßigen Abständen zu überprüfen.

Auch ist eine Zuordnung der Unsicherheiten zu einer Verteilungsfunktion nicht immer eindeutig. Die meisten Verteilungen sehen wie eine Normalverteilung aus, aber bei fast allen ermittelten Verteilungen liegen Schieflagen vor. Hieraus resultiert eine Ungenauigkeit.

Alles in allem liefert die Unsicherheitenanalyse Resultate, die in einer plausiblen Größenordnung liegen. Die ermittelten Bandbreiten könnten sich künftig verkleinern, sofern sich die Datenbasis verbessert. Im Rahmen des Projekts wurden wesentliche Teile des Modells TREMOD-AV von MS Access zu Python migriert, um die nötigen Iterationen der Unsicherheitsberechnung zu ermöglichen. Dies erleichtert die Integration neuer Methoden und Daten in der Zukunft.

5 Quellenverzeichnis

- AG Energiebilanzen (o.J.): Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland.
Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. Erscheinungsweise jährlich. <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2016.htmlx> (28.04.2021).
- Allekotte, M.; Biemann, K.; Heidt, C.; Colson, M.; Knörr, W. (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOM-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018). ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung, Umweltbundesamt, Heidelberg, Dessau-Roßlau. S. 205.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-29_texte_116-2020_tremod_2019_0.pdf (abgerufen am 15.12.2020).
- Anaconda Inc. (2018): Numba: A high performance Python compiler. Anaconda Inc.
- ARTEMIS (2007): Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems.
- autogazette (2012): Falscher Luftdruck bei Mehrheit der Reifen. In: <https://autogazette.de/>.
<https://autogazette.de/bridgestone/reifendruck/umfrage/falscher-luftdruck-bei-mehrheit-der-reifen-364791.html>. (11.05.2022).
- BAFA (2021): Mailanfrage an BAFA bzgl. Unsicherheiten bei der Erfassung.
- BAFA (o.J.): Amtliche Mineralöldaten für die Bundesrepublik Deutschland; Jahresbericht. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). Erscheinungsweise jährlich, im Monatsbericht Dezember.
https://www.bafa.de/SiteGlobals/Forms/Suche/Infothek/Infothek_Formular.html?nn=8064038&submit=Senden&resultsPerPage=100&documentType_=type_statistic&templateQueryString=Amtliche+Daten+Mineral%C3%B6ldaten&sortOrder=dateOfIssue_dt+desc (28.04.2021).
- Bäumer, M.; Hautzinger, H.; Pfeiffer, M.; Stock, W.; Lenz, B.; Kuhnigmhof, T.; Köhler, K. (2016): Fahrleistungserhebung 2014: Begleitung und Auswertung - Schlussbericht zur Inlandsfahrleistung. Mannheim.
- BFE (2015): Faktenblatt - Anpassung der Heizwerte der Erdölprodukte in der Gesamtenergiestatistik. Bundesamt für Energie der Schweizerischen Eidgenossenschaft-Sektion Analysen und Perspektiven, Bern.
- bfp (2018): Sparen durch richtigen Reifendruck. In: <https://www.fuhrpark.de/>.
<https://www.fuhrpark.de/sparen-durch-richtigen-reifendruck>. (11.05.2022).
- Böge, A. (2008): Vieweg Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik.
- Chesneau, S.; Fuller, I.; Hustache, J.-C. (2002): ATM FLIGHT EFFICIENCY AND ITS IMPACT ON THE ENVIRONMENT. Eurocontrol - Experimental Centre.
https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/library/011_ATM_Flight_Efficiency_and_the_Environment.pdf (24.02.2022).
- Chevron (2007): Aviation Fuels - Technical Review. San Ramon. <https://www.chevron.com/-/media/chevron/operations/documents/aviation-tech-review.pdf> (03.03.2022).
- Dellaert, S. N. C.; Dröge, R. (2017): Uncertainty of the NO_x, SO_x, NH₃, PM10, PM2.5, EC2.5 and NMVOC emissions from transport. TNO.
[http://www.emissieregistratie.nl/erpubliek/documenten/Lucht%20\(Air\)/Verkeer%20en%20Vervoer%20\(Transport\)/TNO%20\(2017\)%20Uncertainty%20of%20the%20NOx,%20SOx,%20NH3,%20PM10,%20PM2.5,%20EC2.5%20and%20NMVOC%20emissions%20from%20transport.pdf](http://www.emissieregistratie.nl/erpubliek/documenten/Lucht%20(Air)/Verkeer%20en%20Vervoer%20(Transport)/TNO%20(2017)%20Uncertainty%20of%20the%20NOx,%20SOx,%20NH3,%20PM10,%20PM2.5,%20EC2.5%20and%20NMVOC%20emissions%20from%20transport.pdf) (03.03.2022).
- Destatis (2021): Fachserie 8 - Verkehr 6 - Luftverkehr 1 - Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen. Wiesbaden.

- https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DESerie_mods_00000094 (02.11.2021).
- EEA (2018): Monitoring of CO₂ emissions from passenger cars – Regulation (EC) No 443/2009. European Environment Agency (EEA). <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-and-maps/data/co2-cars-emission-14> (letzter Zugriff 7. 2. 2019).
- EEA (2019): 1.A.3.a Aviation - Annex 5 - Master emission calculator 2019. In: *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - 2019*. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation-1/view>. (12.11.2021).
- EMEP/EEA (2019): EMEP/EEA emission inventory guidebook 2019. Technical guidance to prepare national emission inventories. Uncertainties. European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP), European Environment Agency (EEA), Luxembourg.
- Eurocontrol (2016): EUROCONTROL method for estimating aviation fuel burnt and emissions - EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-03/emep-eea-air-pollution-emission-inventory-method-v1.0.pdf> (02.03.2022).
- Eurocontrol (2021): Taxi times. In: *Eurocontrol - Library*. <https://www.eurocontrol.int/library>. (27.10.2021).
- Europäisches Parlament; Europäischer Rat (2014): Richtlinie 2014/32/EU.
- geoCapture (2022): Reifendruck TPMS: GPS-Ortungssysteme. In: <https://www.geocapture.de/>. <https://www.geocapture.de/funktionen/gps-ortung/reifendruck-tpms>. (11.05.2022).
- Hamburger Abendblatt (2016): Jeder Dritte ist mit falschem Reifendruck unterwegs. In: <https://www.abendblatt.de/>. <https://www.abendblatt.de/ratgeber/automotor/article208751305/Jeder-Dritte-ist-mit-falschem-Reifendruck-unterwegs.html>. (11.05.2022).
- Hausberger, S.; Weller, K. (2018): Relevance of HDV cold engine start NO_x emissions. Integer Emissions Summit & AdBlue Forum TU Graz, Brüssel.
- Hedderich, J.; Sachs, L. (2016): Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R. Springer-Verlag Berlin Heidelberg S. 89, 102–103, 264, 362.
- Hiesmayer, J.; Dippold, M.; Stadlhofer, W.; Zinner, C.; Hausberger, S. (2018): Entwicklung eines Modells zur Generierung von Emissionsfaktoren für motorisierte Zweiräder aus Abgasmessungen. FVT im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen.
- ICAO (2019): Aircraft Engine Emissions Databank. International Civil Aviation Organization. <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank> (29.04.2019).
- ifeu; Öko-Institut (2010): Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Energieeinsätze und Emissionen des zivilen Flugverkehrs (TREMOD-AV). Im Auftrag des Umweltbundesamtes. FKZ 360 16 029. UBA-Texte 48/2012. ISSN 1862-4804, Heidelberg, Berlin.
- IFEU; Öko-Institut (2010): Entwicklung eines eigenständigen Modells zur Berechnung des Flugverkehrs (TREMOD-AV). Im Auftrag des Umweltbundesamtes. FKZ 360 16 029, Berlin, Heidelberg.
- Jasiński, R.; Kurzawska, P.; Przysowa, R. (2021): Characterization of Particle Emissions from a DGEN 380 Small Turbofan Fueled with ATJ Blends. In: *Energies*. Vol. 14, No. 12, S. 3368.
- Jenk, H. (2017): The CONOX project: Pooling, sharing and analyzing European remote sensing data. Presentation held at the European Parliament, Brussels, 28 September 2017. Federal Office for the Environment (FOEN).
- Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Räder, D.; Schillinger, M.; Thienel, M.; Dürrbeck, K.; Schwemmer, M.; Köllermeier, N.; Waßmuth, V. (2021): Potentialanalyse für Batterie-

- Lkw: Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“.
- Jöhrens, J.; Räder, D.; Kräck, J.; Mathieu, L.; Blanck, R.; Kasten, P. (2020): Plug-in hybrid electric cars: Market development, technical analysis and CO₂ emission scenarios for Germany. ifeu, Transport & Environment, Öko-Institut. S. 94.
<https://www.eko.de/uploads/eko/okodoc/PHEV-Report-Market-Technology-CO2.pdf>.
- Jurkat, T.; Voigt, C.; Arnold, F.; Schlager, H.; Kleffmann, J.; Aufmhoff, H.; Schäuble, D.; Schaefer, M.; Schumann, U. (2011): Measurements of HONO, NO, NO_y and SO₂ in aircraft exhaust plumes at cruise. In: *Geophysical Research Letters*. Vol. 38, No. 10, S. n/a-n/a.
- KBA (o.J.): Jährliche Sonderauswertung des Kraftfahrzeugbestands und der Neuzulassungen des Kraftfahrtbundesamtes für TREMOD. Kraftfahrt-Bundesamt.
- Kettunen, T.; Hustache, J.-C.; Fuller, I.; Howell, D.; Bonn, J.; Knorr, D. (2004): Flight Efficiency. S. 10.
- kfz-tech.de (2013): Eigenschaften von Kraftstoffen. <https://www.kfz-tech.de/Biblio/Kraftstoff/Kraftstoff2.htm>. (03.02.2022).
- Knörr, W.; Heldstab, J.; Kasser, F.; Keller, M. (2009): Ermittlung der Unsicherheiten der mit den Modellen TREMOD und TREMOD-MM berechneten Luftsadstoffemissionen des landgebundenen Verkehrs in Deutschland. ifeu, INFRAS im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Kugele, A.; Jelinek, F.; Gaffal, R. (2005): Aircraft Particulate Matter Emission Estimation through all Phases of Flight. Eurocontrol.
- Lawicki, D. (2002): Jet Fuel Characteristics. Boeing.
- Limpert, E.; Werner, A.; Abbt, M. (2001): Log-normal Distributions across the Sciences: Keys and Clues. *BioScience* 10.1641/0006-3568(2001)051[0341:LNDATS]2.0.CO.
- Matzer, C.; Weller, K.; Dippolt, M.; Lipp, S.; Röck, M.; Rexeis, M.; Hausberger, S. (2019): Update of Emission Factors for HBEFA Version 4.1. TU Graz, Graz.
https://www.hbefa.net/d/documents/HBEFA41_Report_TUG_09092019.pdf (20.11.2019).
- Mellios, G.; Ntziachristos, L.; Samaras, Z.; White, L.; Martini, G.; Rose, K. (2019): EMEP-EEA emission inventory guidebook 2019. Chapter 1.A.3.b.v. Gasoline evaporation from vehicles. European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP), European Environment Agency (EEA).
- Morrison, M. (2015): The power list: top 10 delivered commercial turbofans | News | Flight Global. In: [www.flightglobal.com](https://www.flightglobal.com/the-power-list-top-10-delivered-commercial-turbofans/116576.article). <https://www.flightglobal.com/the-power-list-top-10-delivered-commercial-turbofans/116576.article>. (02.03.2022).
- Nobis, C.; Kuhnimhof, T. (2019): Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Bonn. S. 133 S.-133 S. www.mobilitaet-in-deutschland.de.
- Notter, B.; Cox, B.; Jamet, M.; Keller, M.; Cox, B. (2019): HBEFA 4.1 Development Report. INFRAS, ifeu, Bern, Heidelberg.
https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA41_Development_Report.pdf.
- Notter, B.; Cox, B.; Weller, K.; Hausberger, S.; Matzer, C.; Dippold, M.; Lipp, S.; Politschnig, N.; Knörr, W.; Allekotte, M.; Heidt, C.; Kräck, J. (2021): Weiterentwicklung HBEFA 4.2. im Auftrag des Umweltbundesamts *Abschlussbericht*, Infras, TU Graz, ifeu.
- Ntziachristos, L.; Samaras, Z. (2019): EMEP EEA Guidebook - 1.A.3.b.i-iv Road transport 2019. File, <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i> (16.12.2019).
- Olsson, U. (2005): Confidence Intervals for the Mean of a Log-Normal Distribution. *Journal of Statistics Education*, 13:1, DOI: 10.1080/10691898.2005.11910638.

- Reifenpresse (2013): Zu geringe Profiltiefe bei Stichprobe kein Thema, aber der Luftdruck ... - Reifenpresse.de. In: <https://reifenpresse.de/>. <https://reifenpresse.de/2013/10/25/zu-geringe-profiltiefe-bei-stichprobe-kein-thema-aber-der-luftdruck/>. (11.05.2022).
- Rexeis, M. (2009): Ascertainment of Real World Emissions of Heavy Duty Vehicles. Dissertation am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik TU Graz.
- Reynolds, T. (2008): Analysis of Lateral Flight Inefficiency in Global Air Traffic Management. Institute for Aviation and the Environment, University of Cambridge, Cambridge. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2008-8865> (24.02.2022).
- Santoni, G. W.; Lee, B. H.; Wood, E. C.; Herndon, S. C.; Miake-Lye, R. C.; Wofsy, S. C.; McManus, J. B.; Nelson, D. D.; Zahniser, M. S. (2011): Supporting Information for: Aircraft Emissions of Methane and Nitrous Oxide during the Alternative Aviation Fuel Experiment. Harvard University, School of Engineering and Applied Sciences and Department of Earth and Planetary Sciences, Aerodyne Research, Inc., Center for Aero-Thermodynamics and the Center for Atmospheric and Environmental Chemistry, Now at the University of Massachusetts at Amherst, School of Public Health and Health Sciences. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es200897h> (03.03.2022).
- Schaefer, M. (2012): Development of a Forecast Model for Global Air Traffic Emissions. DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Antriebstechnik, Bochum. S. 259. https://elib.dlr.de/77004/1/DLR_Forschungsbericht_2012-08.pdf (02.03.2022).
- Schrodt, A. (2019): Zur regelungsorientierten Identifikation nichtlinearer Systeme mittels lokaler affiner Takagi-Sugeno-Fuzzy-Modelle. Schriftenreihe Mess- und Regelungstechnik Universität Kassel, Kassel.
- Sibbertsen, P.; Lehne, H. (2021): Statistik – Einführung für Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler. Springer-Verlag Berlin Heidelberg S. 38, 57.
- Tarrasón, L.; Jonson, J. E.; Berntsen, T. K.; Rypdal, K. (2004): Study on air quality impacts of non-LTO emissions from aviation. Norwegian Meteorological Institute, Centre for International Climate and Environmental Research- Oslo. https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/air_quality_impacts_finalreport.pdf (03.03.2022).
- Universität Stuttgart; TU Graz; PTV Transport Consultant GmbH (2022): Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Weclas, M.; Tretow, H.-J.; Bernstein, J.; Wellmann, J. (2005): Hochoktan Ottokraftstoffe für Hochleistungsmotoren. Institut für Fahrzeugtechnik der Georg-Simon-Ohm Fachhochschule Nürnberg, Nürnberg. https://www.th-nuernberg.de/fileadmin/abteilungen/kom/kom_docs/Sonderdrucke/29_weclas_fertig.pdf (03.02.2022).
- Weller, K. (2020): Emission Models for Heavy Duty Vehicles Based on On-road Measurements. Dissertation, TU Graz, Graz.
- Whiteley, M. (2018): D2.3 European Aviation Fuel Burn and Emissions Inventory System for the European Environment Agency (for data from 2005). Eurocontrol - Environment and Climate Change Section. <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/201807-european-aviation-fuel-burn-emissions-system-eea-v2.pdf> (04.03.2022).
- Winter, R. (2018): FQMS – Fuel Quality Monitoring System 2017 - Überwachung der Kraftstoffqualität der Republik Österreich gemäß Richtlinie 98/70/EG für das Berichtsjahr 2017. Bundesministerium Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien.
- Winther, M. (2020): Danish emission inventories for road transport and other mobile sources. Danish Centre for Environment and Energy, Aarhus. <https://dce2.au.dk/pub/SR411.pdf> (03.03.2022).

Yang, I.-Y. (2011): Measurement Uncertainty Analysis of a Turbine Flowmeter for Fuel Flow Measurement in Altitude Engine Test. In: *Journal of Fluid Machinery*. Vol. 14, No. 1, S. 42–47.

Zallinger, M. (2010): Mikroskopische Simulation der Emissionen von Personenkraftfahrzeugen. Dissertation am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik TU Graz.

A Anhang zu den Schichtemissionsfaktoren – Straßenverkehr

A.1 Ergebnisse regulierte Schadstoffe: Pkw/LNF N1 Klasse 1

A.1.1 Basis EF Diesel

Tabelle 67: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel – CO

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1**	-99%	581%	-99%	581%	-99%	581%
EURO 1**	-99%	583%	-99%	581%	-99%	583%
EURO 2**	-99%	582%	-99%	582%	-99%	584%
EURO 3**	-99%	582%	-99%	583%	-99%	582%
EURO 4**	-99%	582%	-99%	581%	-99%	581%
EURO 5	-79%	204%	-71%	155%	-69%	145%
EURO 6abc	-52%	87%	-52%	85%	-51%	84%
EURO 6d-TEMP	-80%	215%	-83%	233%	-79%	202%
EURO 6d*	-81%	217%	-83%	234%	-79%	203%

Anmerkungen: *Stichproben- und Modell- Unsicherheiten von EURO 6d-TEMP übernommen; **Hohe Modellunsicherheit. Diese wurde aus (Zallinger 2010) übernommen und ist auf CO-Spitzen in den Erstellungszyklen der Emissionskennfelder zurückzuführen.

Tabelle 68: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel – HC

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1	-36%	50%	-41%	59%	-37%	51%
EURO 1	-43%	63%	-46%	70%	-45%	68%
EURO 2	-41%	59%	-42%	61%	-46%	71%
EURO 3	-54%	91%	-39%	55%	-40%	58%
EURO 4	-39%	54%	-36%	50%	-40%	58%
EURO 5	-51%	82%	-50%	80%	-50%	81%
EURO 6abc	-63%	121%	-59%	108%	-58%	104%
EURO 6d-TEMP	-67%	138%	-72%	163%	-84%	246%
EURO 6d*	-67%	139%	-72%	163%	-84%	247%

Anmerkung: *Stichproben- und Modell- Unsicherheiten von EURO 6d-TEMP übernommen.

Tabelle 69: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel – PM

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1	-49%	78%	-63%	123%	-69%	148%
EURO 1	-27%	34%	-48%	76%	-69%	147%
EURO 2	-41%	58%	-44%	65%	-69%	147%
EURO 3	-30%	39%	-30%	39%	-69%	147%
EURO 4	-37%	52%	-36%	50%	-30%	39%
EURO 5	-77%	193%	-78%	196%	-79%	206%
EURO 6abc	-60%	112%	-61%	115%	-66%	132%
EURO 6d-TEMP	-83%	238%	-83%	234%	-79%	205%
EURO 6d*	-83%	237%	-83%	233%	-79%	204%

Anmerkung: *Stichproben- und Modell- Unsicherheiten von EURO 6d-TEMP übernommen.

A.1.2 Basis EF Benzin

Tabelle 70: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin – NOx

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1	-34%	45%	-35%	47%	-31%	40%
EURO 1	-58%	103%	-65%	131%	-72%	159%
EURO 2	-44%	67%	-48%	75%	-48%	76%
EURO 3	-25%	30%	-24%	29%	-31%	41%
EURO 4	-25%	30%	-22%	26%	-59%	106%
EURO 5	-44%	67%	-32%	42%	-29%	38%
EURO 6abc	-32%	41%	-34%	45%	-37%	51%
EURO 6d-TEMP	-40%	58%	-46%	70%	-58%	105%
EURO 6d*	-41%	59%	-46%	71%	-59%	106%

Anmerkung: *Stichproben- und Modell- Unsicherheiten von EURO 6d-TEMP übernommen.

Tabelle 71: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin – CO

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1	-71%	158%	-72%	159%	-56%	96%
EURO 1	-69%	146%	-64%	126%	-46%	70%
EURO 2	-52%	86%	-63%	120%	-62%	116%

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
EURO 3	-46%	71%	-41%	60%	-45%	69%
EURO 4	-49%	77%	-47%	73%	-48%	76%
EURO 5	-53%	87%	-51%	83%	-54%	90%
EURO 6abc	-37%	52%	-38%	53%	-33%	44%
EURO 6d-TEMP	-54%	91%	-52%	85%	-44%	66%
EURO 6d*	-53%	90%	-51%	84%	-43%	65%

Anmerkung: *Stichproben- und Modell- Unsicherheiten von EURO 6d-TEMP übernommen.

Tabelle 72: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin – HC

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1	-68%	140%	-64%	127%	-32%	41%
EURO 1	-74%	170%	-78%	199%	-74%	173%
EURO 2	-34%	45%	-32%	42%	-46%	71%
EURO 3	-38%	53%	-35%	47%	-26%	32%
EURO 4	-36%	49%	-30%	39%	-36%	49%
EURO 5	-36%	50%	-48%	74%	-45%	68%
EURO 6abc	-36%	49%	-34%	46%	-32%	43%
EURO 6d-TEMP	-60%	111%	-51%	84%	-50%	81%
EURO 6d*	-60%	112%	-52%	85%	-51%	83%

Anmerkung: *Stichproben- und Modell- Unsicherheiten von EURO 6d-TEMP übernommen.

Tabelle 73: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin – PM

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1	-60%	112%	-74%	170%	-69%	147%
EURO 1	-60%	112%	-74%	170%	-69%	147%
EURO 2	-60%	110%	-73%	169%	-69%	145%
EURO 3	-46%	71%	-36%	50%	-69%	145%
EURO 4	-39%	55%	-39%	55%	-36%	50%
EURO 5	-63%	123%	-74%	174%	-78%	195%
EURO 6abc	-30%	38%	-32%	43%	-37%	51%
EURO 6d-TEMP	-54%	90%	-63%	121%	-75%	178%
EURO 6d*	-54%	92%	-64%	123%	-75%	180%

Anmerkung: *Stichproben- und Modell- Unsicherheiten von EURO 6d-TEMP übernommen.

A.2 Ergebnisse regulierte Schadstoffe: LNF N1 Klasse 2 und 3

A.2.1 Basis EF Diesel

Tabelle 74: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 II – CO

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1*	-99%	581%	-99%	581%	-99%	581%
EURO 1*	-99%	582%	-99%	581%	-99%	583%
EURO 2*	-99%	587%	-99%	591%	-99%	599%
EURO 3*	-99%	589%	-99%	593%	-99%	590%
EURO 4*	-99%	588%	-99%	587%	-99%	585%
EURO 5*	-96%	460%	-93%	368%	-91%	342%
EURO 6abc*	-69%	144%	-66%	134%	-65%	127%
EURO 6d-TEMP**	-86%	270%	-88%	290%	-85%	254%
EURO 6d**	-86%	272%	-88%	291%	-85%	256%

Anmerkungen: *Aufschläge auf Stichprobenunsicherheit über Verhältnis der Stichprobengröße Pkw/LNF; **Aufschlag 25 % auf gesamte Unsicherheit im Vergleich zu Pkw.

Tabelle 75: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 II – HC

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1*	-34%	46%	-36%	50%	-35%	47%
EURO 1*	-40%	58%	-43%	64%	-42%	62%
EURO 2*	-66%	135%	-69%	148%	-77%	190%
EURO 3*	-85%	261%	-61%	115%	-65%	131%
EURO 4*	-61%	115%	-54%	92%	-65%	131%
EURO 5*	-68%	141%	-65%	131%	-66%	135%
EURO 6abc*	-89%	302%	-85%	259%	-84%	245%
EURO 6d-TEMP**	-75%	178%	-79%	208%	-89%	305%
EURO 6d**	-75%	178%	-79%	208%	-89%	305%

Anmerkungen: *Aufschläge auf Stichprobenunsicherheit über Verhältnis der Stichprobengröße Pkw/LNF; **Aufschlag 25 % auf gesamte Unsicherheit im Vergleich zu Pkw.

Tabelle 76: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 II – PM

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1*	-35%	48%	-44%	67%	-49%	78%

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
EURO 1*	-26%	33%	-35%	47%	-49%	77%
EURO 2*	-73%	165%	-77%	191%	-95%	407%
EURO 3*	-48%	75%	-48%	75%	-95%	407%
EURO 4*	-67%	139%	-65%	131%	-49%	78%
EURO 5*	-96%	454%	-96%	459%	-97%	473%
EURO 6abc*	-85%	258%	-86%	268%	-90%	323%
EURO 6d-TEMP**	-88%	296%	-88%	291%	-85%	258%
EURO 6d**	-88%	295%	-88%	290%	-85%	257%

Anmerkungen: *Aufschläge auf Stichprobenunsicherheit über Verhältnis der Stichprobengröße Pkw/LNF; **Aufschlag 25 % auf gesamte Unsicherheit im Vergleich zu Pkw.

Tabelle 77: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 III – NO_x

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1*	-44%	66%	-35%	47%	-27%	34%
EURO 1*	-29%	37%	-25%	31%	-28%	35%
EURO 2*	-29%	37%	-30%	39%	-32%	42%
EURO 3*	-32%	42%	-29%	37%	-38%	53%
EURO 4*	-31%	41%	-30%	39%	-31%	41%
EURO 5*	-54%	91%	-53%	90%	-53%	90%
EURO 6abc*	-60%	109%	-60%	109%	-60%	111%
EURO 6d-TEMP**	-82%	229%	-81%	219%	-78%	200%
EURO 6d**	-82%	229%	-81%	219%	-78%	200%

Anmerkungen: *Aufschläge auf Stichprobenunsicherheit über Verhältnis der Stichprobengröße Pkw/LNF; **Aufschlag 25 % auf gesamte Unsicherheit im Vergleich zu Pkw.

Tabelle 78: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 III – CO

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1*	-99%	581%	-99%	581%	-99%	581%
EURO 1*	-99%	585%	-99%	582%	-99%	585%
EURO 2*	-99%	584%	-99%	586%	-99%	591%
EURO 3*	-99%	589%	-99%	593%	-99%	590%
EURO 4*	-99%	586%	-99%	585%	-99%	584%
EURO 5*	-87%	275%	-79%	204%	-77%	188%

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
EURO 6abc*	-66%	131%	-63%	123%	-62%	117%
EURO 6d-TEMP**	-86%	270%	-88%	290%	-85%	254%
EURO 6d**	-86%	272%	-88%	291%	-85%	256%

Anmerkungen: *Aufschläge auf Stichprobenunsicherheit über Verhältnis der Stichprobengröße Pkw/LNF; **Aufschlag 25 % auf gesamte Unsicherheit im Vergleich zu Pkw.

Tabelle 79: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 III – HC

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1*	-36%	50%	-41%	59%	-37%	51%
EURO 1*	-48%	76%	-53%	87%	-51%	84%
EURO 2*	-54%	91%	-56%	98%	-64%	124%
EURO 3*	-85%	261%	-61%	115%	-65%	131%
EURO 4*	-54%	91%	-48%	75%	-58%	102%
EURO 5*	-54%	92%	-53%	88%	-53%	90%
EURO 6abc*	-79%	202%	-74%	173%	-73%	164%
EURO 6d-TEMP**	-75%	178%	-79%	208%	-89%	305%
EURO 6d**	-75%	178%	-79%	208%	-89%	305%

Anmerkungen: *Aufschläge auf Stichprobenunsicherheit über Verhältnis der Stichprobengröße Pkw/LNF; **Aufschlag 25 % auf gesamte Unsicherheit im Vergleich zu Pkw.

Tabelle 80: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Diesel-LNF N1 III – PM

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1*	-44%	65%	-57%	100%	-63%	120%
EURO 1*	-27%	33%	-43%	64%	-63%	119%
EURO 2*	-56%	97%	-60%	111%	-86%	266%
EURO 3*	-48%	75%	-48%	75%	-95%	407%
EURO 4*	-57%	100%	-55%	95%	-41%	60%
EURO 5*	-85%	260%	-86%	265%	-87%	278%
EURO 6abc*	-67%	140%	-69%	144%	-74%	173%
EURO 6d-TEMP**	-88%	296%	-88%	291%	-85%	258%
EURO 6d**	-88%	295%	-88%	290%	-85%	257%

Anmerkungen: *Aufschläge auf Stichprobenunsicherheit über Verhältnis der Stichprobengröße Pkw/LNF; **Aufschlag 25 % auf gesamte Unsicherheit im Vergleich zu Pkw.

A.2.2 Basis EF Benzin

Tabelle 81: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin-LNF N1 II und N1 III – NO_x

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1*	-40%	58%	-42%	61%	-37%	51%
EURO 1*	-66%	133%	-73%	168%	-79%	203%
EURO 2*	-52%	87%	-56%	97%	-56%	99%
EURO 3*	-30%	39%	-29%	38%	-37%	52%
EURO 4*	-30%	39%	-27%	33%	-67%	137%
EURO 5*	-52%	86%	-38%	54%	-35%	48%
EURO 6abc*	-38%	53%	-40%	58%	-44%	66%
EURO 6d-TEMP*	-48%	74%	-53%	90%	-67%	136%
EURO 6d*	-48%	76%	-54%	92%	-67%	138%

Anmerkung: *Aufschlag 25 % auf gesamte Unsicherheit im Vergleich zu Pkw.

Tabelle 82: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin-LNF N1 II und N1 III – CO

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1*	-79%	202%	-79%	204%	-64%	124%
EURO 1*	-77%	188%	-72%	162%	-54%	90%
EURO 2*	-60%	111%	-71%	154%	-70%	149%
EURO 3*	-54%	91%	-49%	77%	-53%	89%
EURO 4*	-57%	100%	-55%	95%	-56%	99%
EURO 5*	-61%	113%	-59%	107%	-62%	117%
EURO 6abc*	-44%	67%	-45%	68%	-40%	57%
EURO 6d-TEMP*	-62%	117%	-60%	110%	-52%	85%
EURO 6d*	-62%	116%	-60%	109%	-51%	84%

Anmerkung: *Aufschlag 25 % auf gesamte Unsicherheit im Vergleich zu Pkw.

Tabelle 83: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin-LNF N1 II und N1 III – HC

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1*	-75%	180%	-72%	163%	-38%	53%
EURO 1*	-81%	216%	-85%	251%	-81%	220%
EURO 2*	-40%	58%	-38%	54%	-54%	92%
EURO 3*	-45%	68%	-42%	61%	-31%	41%

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
EURO 4*	-43%	63%	-36%	50%	-43%	63%
EURO 5*	-43%	64%	-56%	96%	-53%	88%
EURO 6abc*	-43%	63%	-41%	59%	-39%	55%
EURO 6d-TEMP*	-68%	143%	-59%	108%	-58%	105%
EURO 6d*	-69%	144%	-60%	110%	-59%	107%

Anmerkung: *Aufschlag 25 % auf gesamte Unsicherheit im Vergleich zu Pkw.

Tabelle 84: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – Benzin-LNF N1 II und N1 III – PM

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO 1*	-69%	145%	-81%	217%	-77%	188%
EURO 1*	-69%	145%	-81%	217%	-77%	188%
EURO 2*	-68%	142%	-80%	215%	-76%	186%
EURO 3*	-54%	91%	-43%	64%	-76%	186%
EURO 4*	-46%	70%	-46%	71%	-43%	64%
EURO 5*	-71%	158%	-81%	222%	-84%	246%
EURO 6abc*	-36%	49%	-39%	55%	-44%	66%
EURO 6d-TEMP*	-62%	117%	-71%	156%	-82%	226%
EURO 6d*	-63%	120%	-71%	159%	-82%	228%

Anmerkung: *Aufschlag 25 % auf gesamte Unsicherheit im Vergleich zu Pkw.

A.3 Ergebnisse regulierte Schadstoffe: SNF und Busse – Basis EF

Tabelle 85: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – SNF und Busse – CO

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO I	-27%	35%	-27%	34%	-27%	34%
EURO I	-27%	33%	-27%	33%	-27%	33%
EURO II	-31%	40%	-31%	40%	-31%	40%
EURO III	-29%	38%	-29%	38%	-29%	38%
EURO IV	-53%	89%	-53%	89%	-53%	89%
EURO V	-55%	93%	-55%	94%	-55%	93%
EURO VIA-C	-85%	259%	-85%	259%	-85%	259%
EURO VID	-81%	220%	-81%	221%	-81%	220%

Tabelle 86: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – SNF und Busse – HC

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO I	-27%	34%	-27%	34%	-27%	35%
EURO I	-24%	30%	-24%	30%	-24%	30%
EURO II	-24%	29%	-24%	29%	-24%	29%
EURO III	-25%	30%	-25%	30%	-25%	30%
EURO IV	-30%	38%	-30%	38%	-30%	38%
EURO V	-31%	40%	-31%	40%	-31%	41%
EURO VIA-C	-87%	278%	-87%	278%	-87%	278%
EURO VID	-87%	278%	-87%	278%	-87%	278%

Tabelle 87: Unsicherheiten Basis Emissionsfaktoren – SNF und Busse – PM

Emissionsklasse	Innerorts (UG)	Innerorts (OG)	Überland (UG)	Überland (OG)	Autobahn (UG)	Autobahn (OG)
Pre EURO I	-16%	19%	-16%	19%	-16%	19%
EURO I	-17%	19%	-16%	19%	-16%	19%
EURO II	-24%	30%	-24%	30%	-24%	29%
EURO III	-18%	21%	-18%	21%	-18%	21%
EURO IV	-32%	43%	-32%	43%	-32%	43%
EURO V	-32%	42%	-32%	42%	-32%	42%
EURO VIA-C	-49%	77%	-49%	77%	-50%	81%
EURO VID	-41%	60%	-41%	60%	-41%	60%

A.4 Ergebnisse nicht-regulierte Schadstoffe

Tabelle 88: Unsicherheiten NH₃ und N₂O-Schichtemissionsfaktoren für Pkw und LNF Diesel Euro-5 und -6

Emissionskonzept	Straßen-kategorie	U (UG)	U (OG)	Verteilung	Quelle
Diesel Euro 5	AB	95%	102%	log-normal	Messwerte DBEFA
	ao	95%	191%	log-normal	Messwerte DBEFA
	io	95%	167%	log-normal	Messwerte DBEFA
Diesel Euro 6	AB	95%	455%	log-normal	Messwerte DBEFA
	ao	84%	84%	normal	Messwerte DBEFA
	io	95%	323%	log-normal	Messwerte DBEFA

Tabelle 89: Unsicherheiten NH₃ und N₂O-Schichtemissionsfaktoren für alle Fahrzeugschichten außer Pkw und LNF Diesel Euro-5 und -6

Emissionskonzept aggregiert	U (UG)	U(OG)	Verteilung	Quelle
Pkw+LNF Otto konventionell	95%	305%	log-normal	EMEP/EEA 2019
Pkw+LNF Otto mit Katalysator	30%	30%	normal	EMEP/EEA 2019
Pkw+LNF Diesel (alle)	60%	60%	normal	EMEP/EEA 2019
Pkw+LNF Gas	30%	30%	normal	Expertenschätzung
Pkw+LNF LPG	95%	505%	log-normal	EMEP/EEA 2019
Pkw+LNF PHEV	30%	30%	normal	Expertenschätzung
SNF Otto	95%	505%	log-normal	EMEP/EEA 2019
SNF Diesel	60%	60%	normal	EMEP/EEA 2019
SNF Gas	95%	505%	log-normal	Expertenschätzung
SNF LNG	95%	505%	log-normal	Expertenschätzung
2-Takt-KR Otto konventionell	60%	60%	normal	EMEP/EEA 2019
2-Takt-KR Otto mit Katalysator	60%	60%	normal	EMEP/EEA 2019
4-Takt-KR Otto konventionell	60%	60%	normal	EMEP/EEA 2019
4-Takt-KR Otto mit Katalysator	60%	60%	normal	EMEP/EEA 2019

Tabelle 90: Unsicherheiten CH₄- und NMVOC-Anteile an den Gesamt-Kohlenwasserstoffen (HC)

Antriebstechnologie/Emissionsklasse	U (UG)	U(OG)	Verteilung	Quelle
Otto Pre Euro 1	4%	4%	normal	Messwerte DBEFA
Otto Euro 1	9%	9%	normal	Messwerte DBEFA
Otto Euro 2	22%	22%	normal	Messwerte DBEFA
Otto Euro 3	34%	34%	normal	Messwerte DBEFA
Otto Euro 4	45%	45%	normal	Messwerte DBEFA
Otto Euro 5	41%	41%	normal	Messwerte DBEFA
Otto Euro 6	29%	29%	normal	Messwerte DBEFA
Diesel Pre Euro 1	8%	8%	normal	Messwerte DBEFA
Diesel Euro 1	8%	8%	normal	Messwerte DBEFA
Diesel Euro 2	17%	17%	normal	Messwerte DBEFA
Diesel Euro 3	35%	35%	normal	Messwerte DBEFA
Diesel Euro 4	52%	52%	normal	Messwerte DBEFA
Diesel Euro 5	64%	64%	normal	Messwerte DBEFA
Diesel Euro 6	54%	54%	normal	Messwerte DBEFA

Tabelle 91: Unsicherheiten der Anteile Black Carbon (BC) an PM2.5

Emissionskonzept aggregiert	U (UG)	U(OG)	Verteilung	Quelle
LMW Otto konventionell	50%	50%	normal	EMEP/EEA 2019
LMW Otto Euro 1 bis Euro 6	30%	30%	normal	EMEP/EEA 2019
LMW Diesel konventionell bis Euro 2	10%	10%	normal	EMEP/EEA 2019
LMW Diesel Euro 3 bis Euro 4 (ohne DPF)	5%	5%	normal	EMEP/EEA 2019
LMW Diesel ab Euro 4 (mit DPF)	50%	50%	normal	EMEP/EEA 2019
SNF Otto	50%	50%	normal	EMEP/EEA 2019
SNF Diesel bis Euro 5	20%	20%	normal	EMEP/EEA 2019
SNF Diesel bis Euro 6	30%	30%	normal	EMEP/EEA 2019
SNF Gas	30%	30%	normal	Expertenschätzung
SNF LNG	30%	30%	normal	Expertenschätzung
KR (alle)	50%	50%	normal	EMEP/EEA 2019

Tabelle 92: Unsicherheiten der Schwefelgehalte nach Kraftstoffart

Kraftstoff	U95% (UG)	U95% (OG)	Verteilung	Quelle
Ottokraftstoff	-58%	210%	normal	Aktuelles Projekt (ifeu)
Dieselkraftstoff	-12%	80%	normal	Aktuelles Projekt (ifeu)
Gas	-58%	210%	normal	Aktuelles Projekt (ifeu)

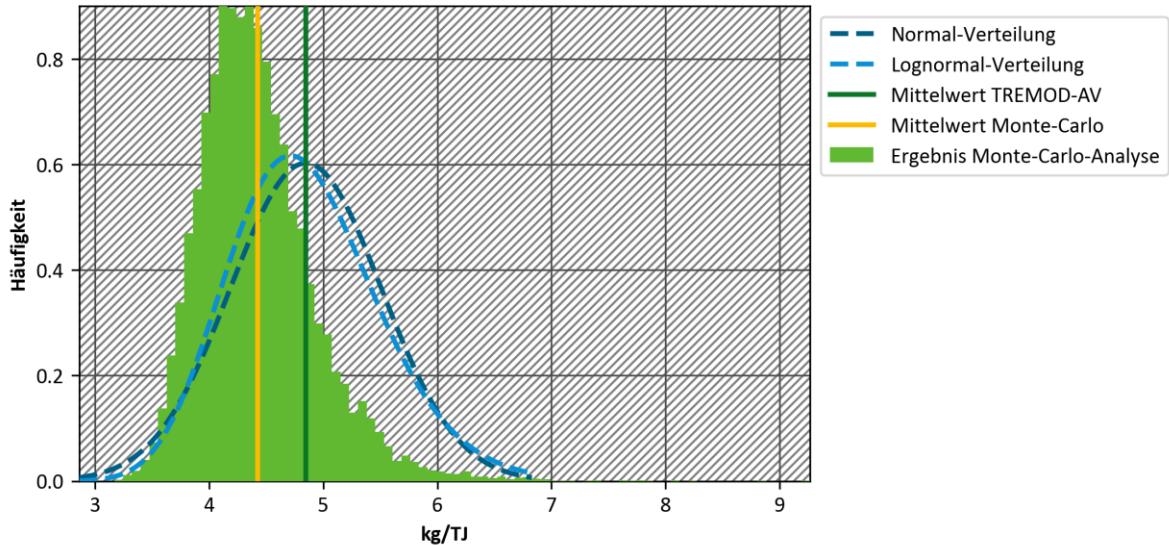
B Anhang zu den Ergebnissen – Flugverkehr

B.1 Verteilungsfunktionen der Emissionsfaktoren der LTO-Phase und deren Parameter

Abbildung 33: Verteilung CH₄ – LTO international Kerosin

International, LTO, Kerosin (K)

CH₄ | Normal(0.025, 0.975): 3.55kg/TJ, 6.14kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 3.68kg/TJ, 6.27kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

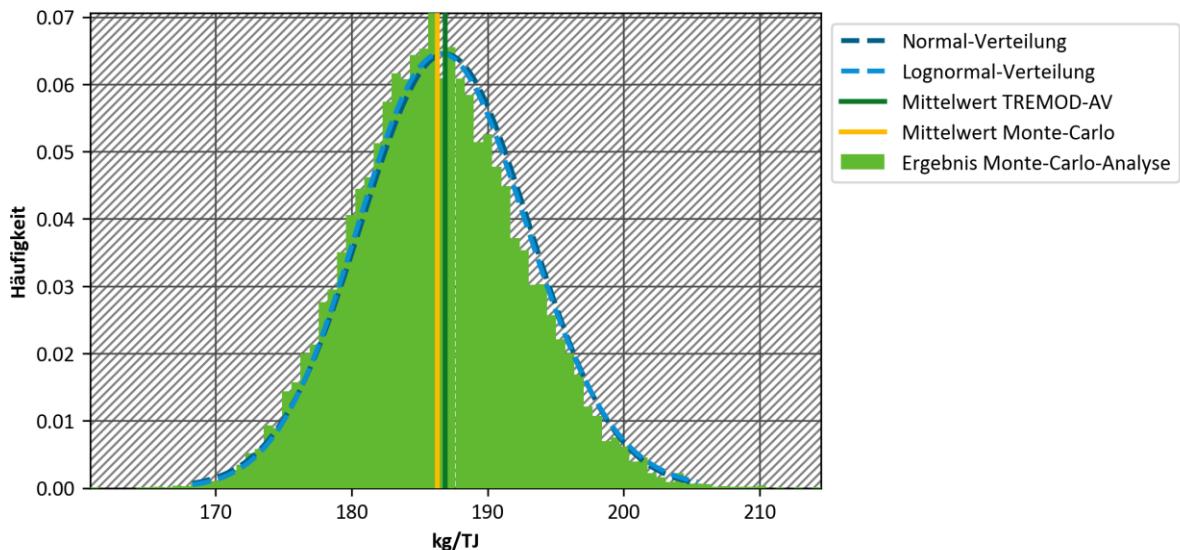


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 34: Verteilung CO – LTO international Kerosin

International, LTO, Kerosin (K)

CO | Normal(0.025, 0.975): 174.75kg/TJ, 198.99kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 175.04kg/TJ, 199.28kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

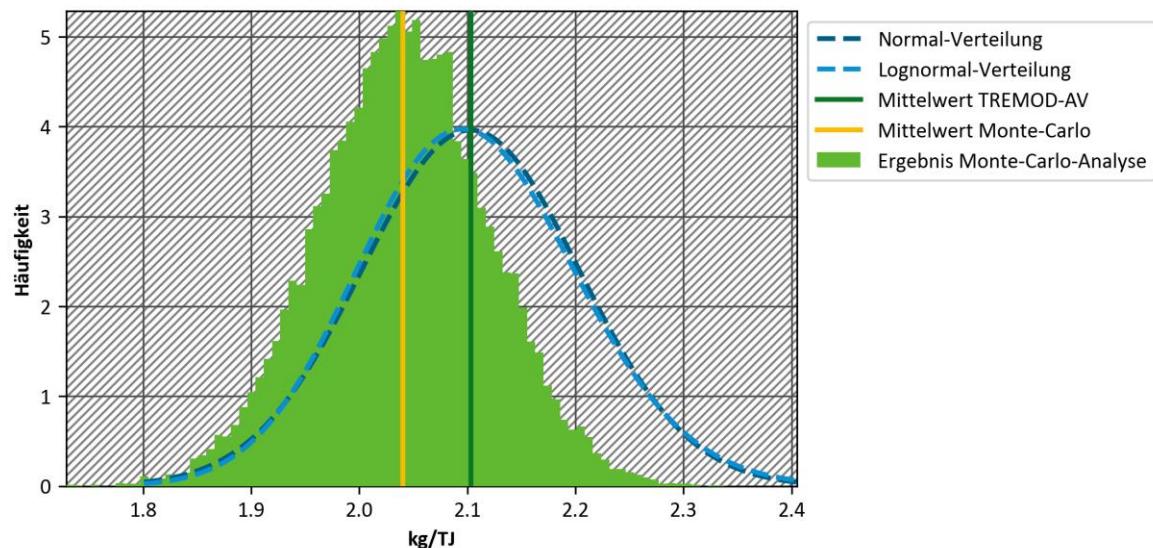


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 35: Verteilung N₂O – LTO international Kerosin

International, LTO, Kerosin (K)

N₂O | Normal(0.025, 0.975): 1.91kg/TJ, 2.30kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.91kg/TJ, 2.31kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

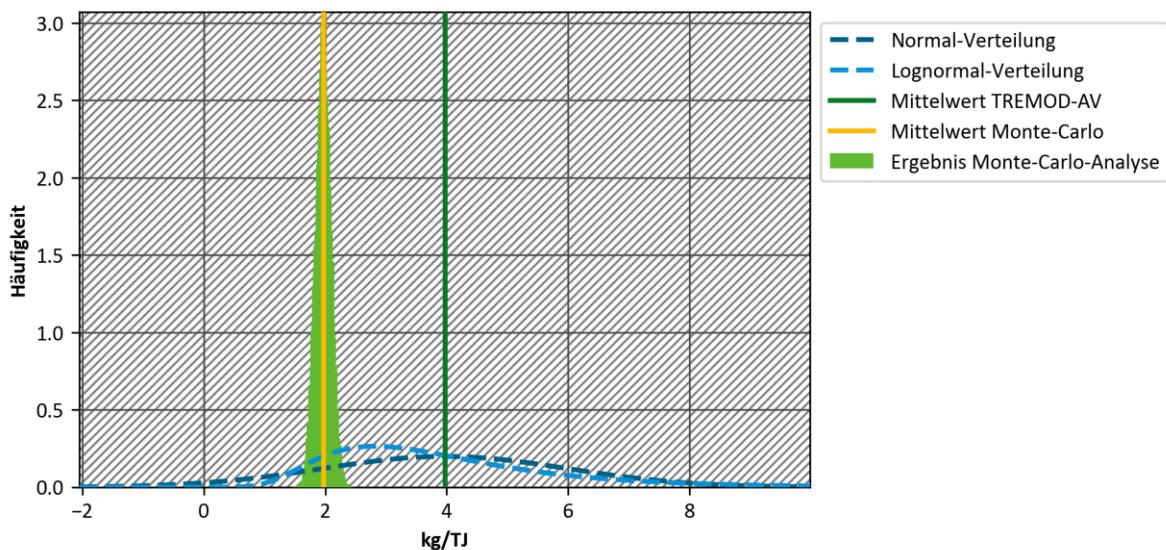


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 36: Verteilung NH₃ – LTO international Kerosin

International, LTO, Kerosin (K)

NH₃ | Normal(0.025, 0.975): 0.04kg/TJ, 7.91kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.39kg/TJ, 9.03kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

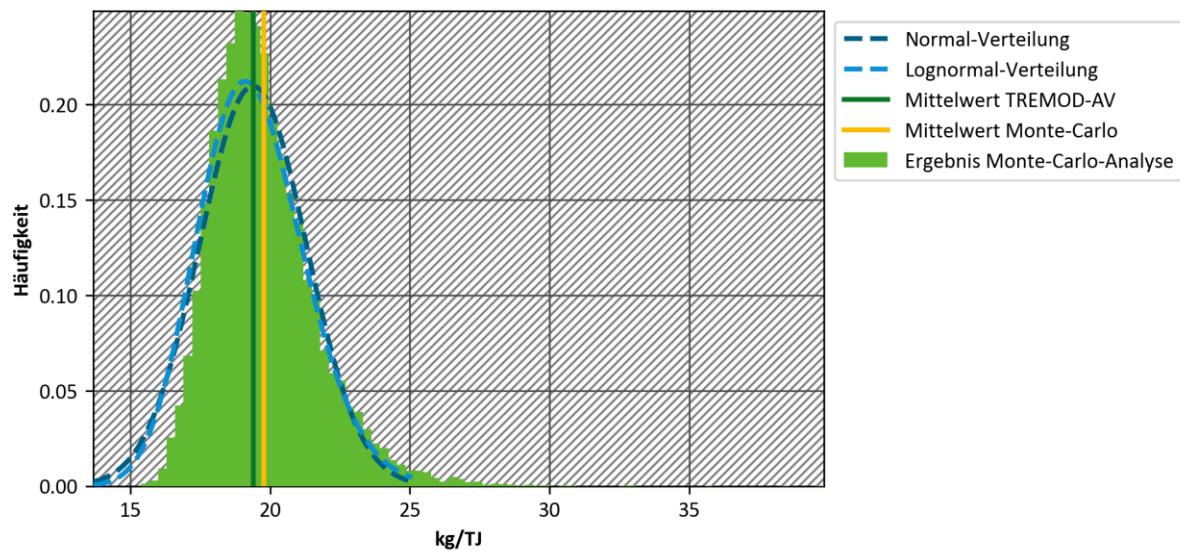


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 37: Verteilung NMVOC – LTO international Kerosin

International, LTO, Kerosin (K)

NMVOC | Normal(0.025, 0.975): 15.66kg/TJ, 23.12kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 15.92kg/TJ, 23.38kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

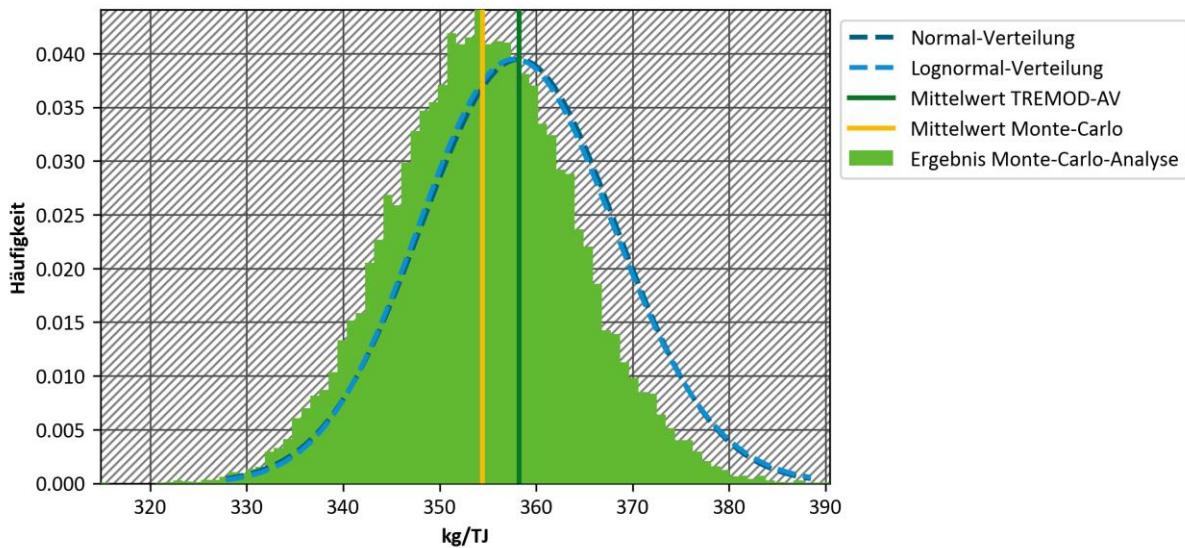


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 38: Verteilung NO_x – LTO international Kerosin

International, LTO, Kerosin (K)

NO_x | Normal(0.025, 0.975): 338.37kg/TJ, 378.01kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 338.78kg/TJ, 378.42kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

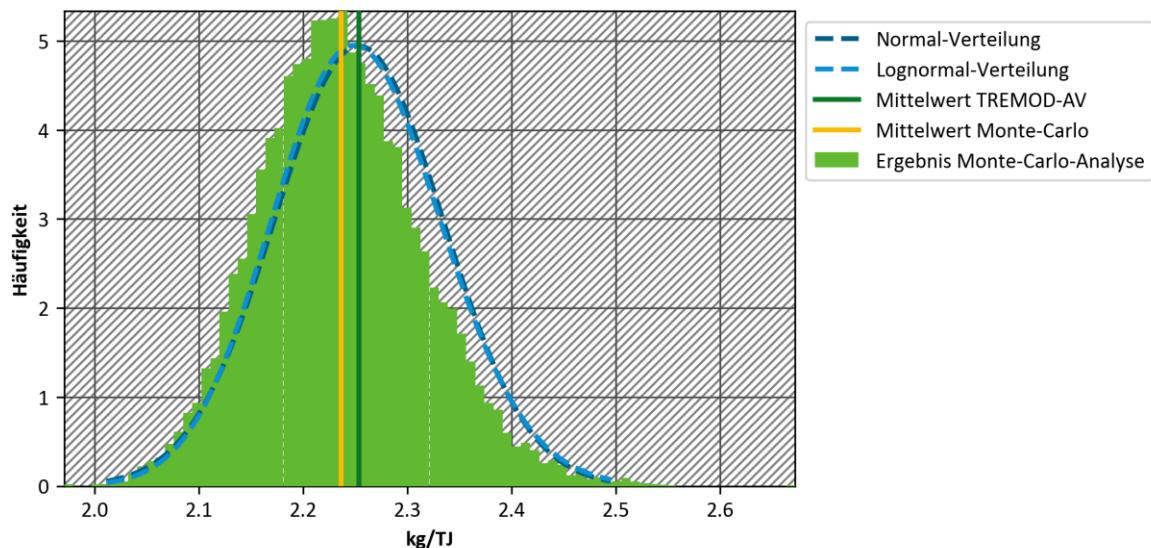


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 39: Verteilung PM – LTO international Kerosin

International, LTO, Kerosin (K)

PM | Normal(0.025, 0.975): 2.10kg/TJ, 2.41kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 2.10kg/TJ, 2.42kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

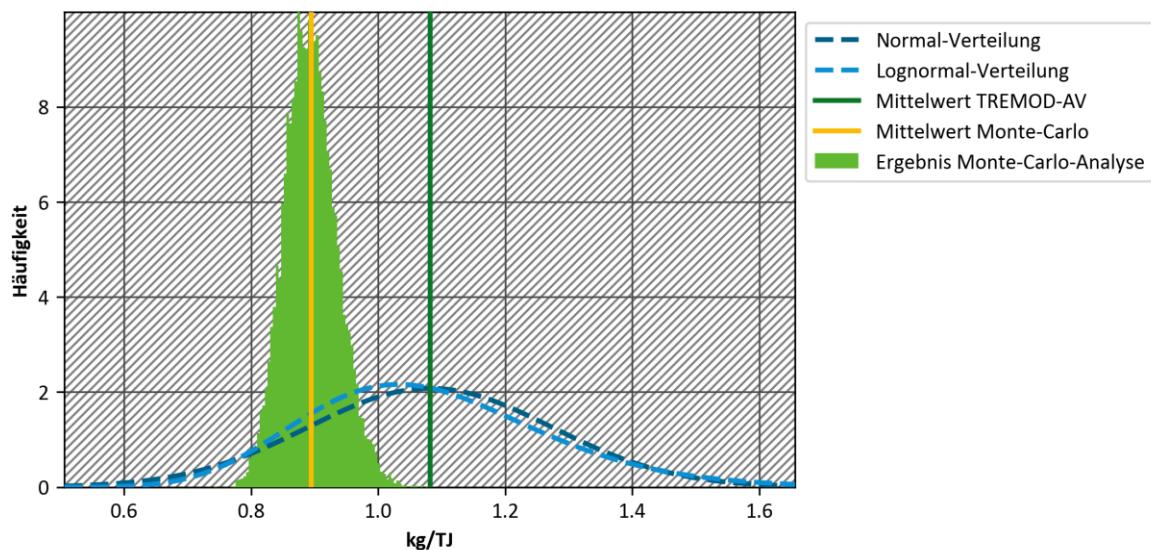


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 40: Verteilung BC – LTO international Kerosin

International, LTO, Kerosin (K)

BC | Normal(0.025, 0.975): 0.71kg/TJ, 1.46kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 0.75kg/TJ, 1.50kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

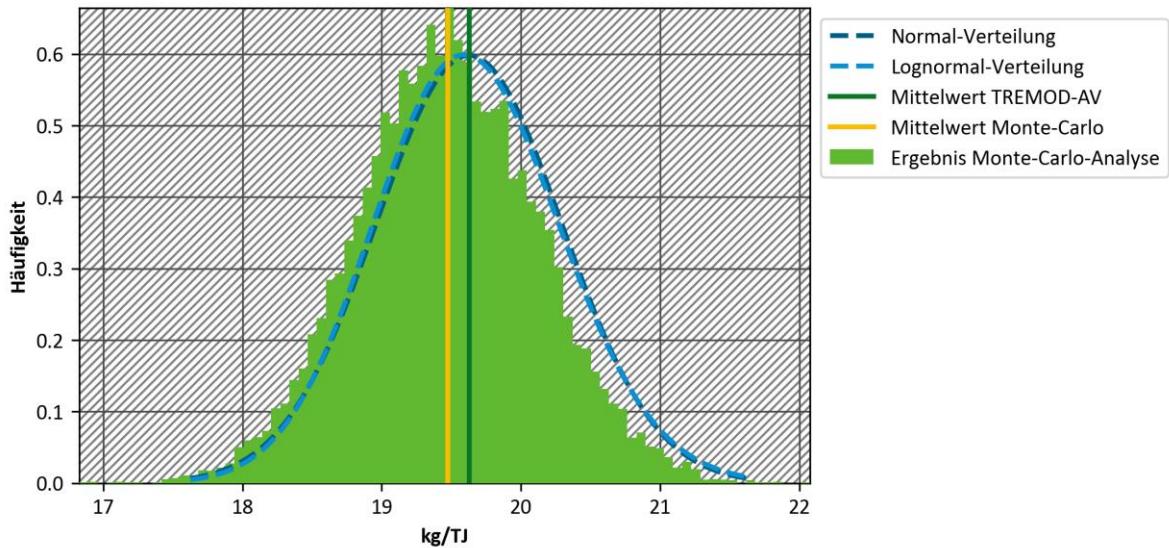


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 41: Verteilung SO₂ – LTO international Kerosin

International, LTO, Kerosin (K)

SO₂ | Normal(0.025, 0.975): 18.32kg/TJ, 20.93kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 18.35kg/TJ, 20.97kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

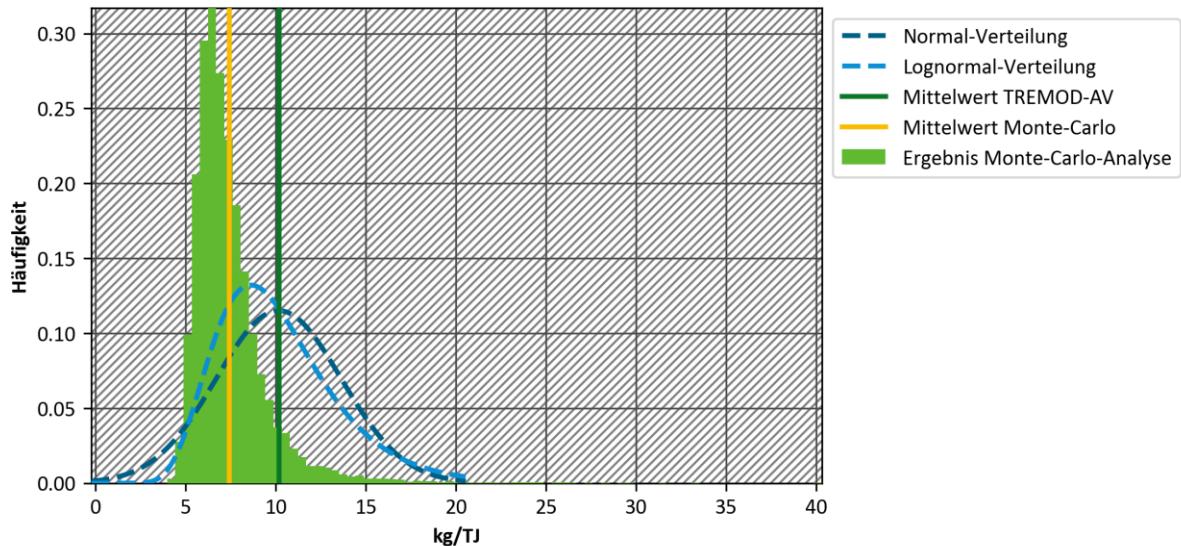


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 42: Verteilung CH₄ – LTO national Kerosin

National, LTO, Kerosin (K)

CH₄ | Normal(0.025, 0.975): 3.36kg/TJ, 16.95kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 5.01kg/TJ, 18.42kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

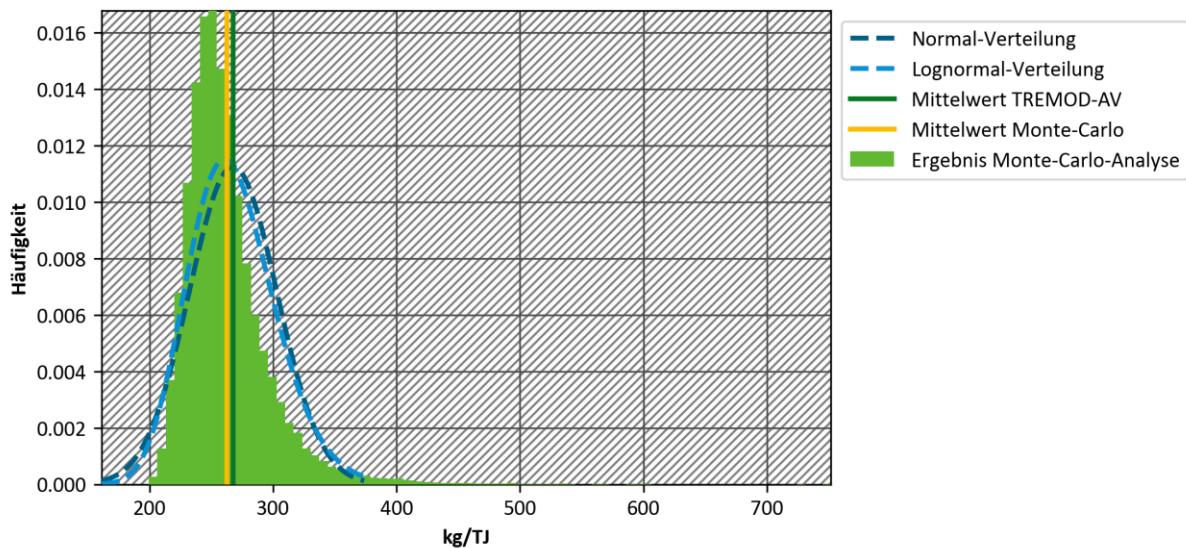


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 43: Verteilung CO – LTO national Kerosin

National, LTO, Kerosin (K)

CO | Normal(0.025, 0.975): 198.05kg/TJ, 337.08kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 204.79kg/TJ, 343.55kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

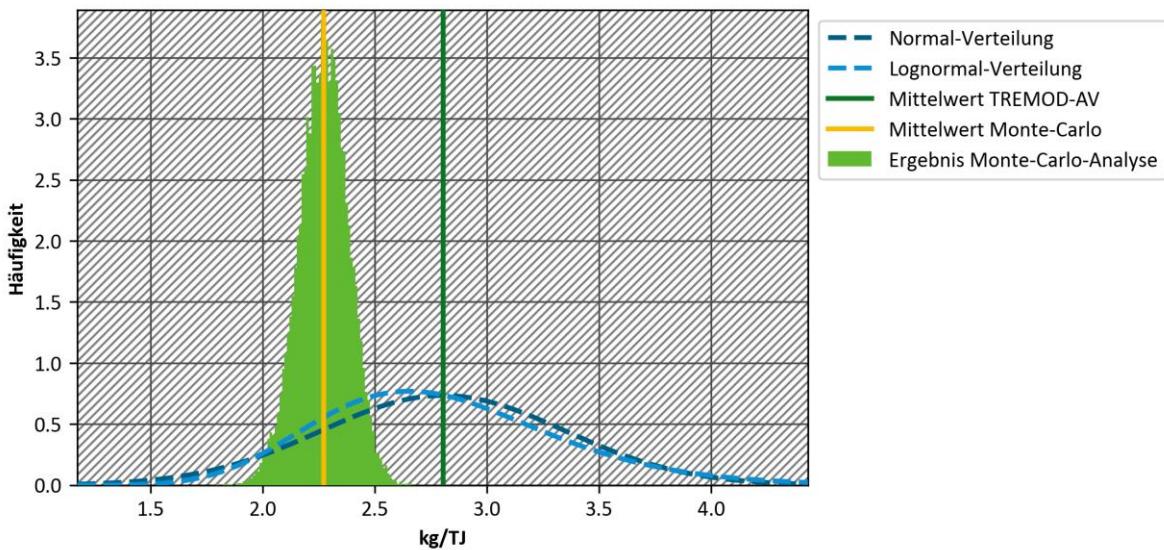


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 44: Verteilung N₂O – LTO national Kerosin

National, LTO, Kerosin (K)

N₂O | Normal(0.025, 0.975): 1.74kg/TJ, 3.87kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.89kg/TJ, 4.01kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

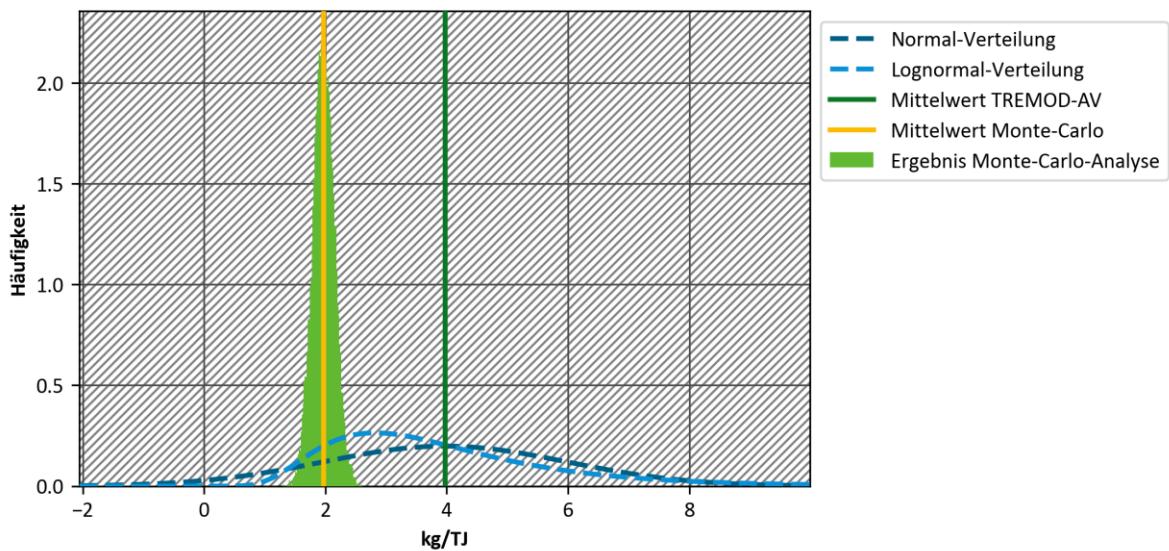


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 45: Verteilung NH₃ – LTO national Kerosin

National, LTO, Kerosin (K)

NH₃ | Normal(0.025, 0.975): 0.03kg/TJ, 7.91kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.39kg/TJ, 9.04kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

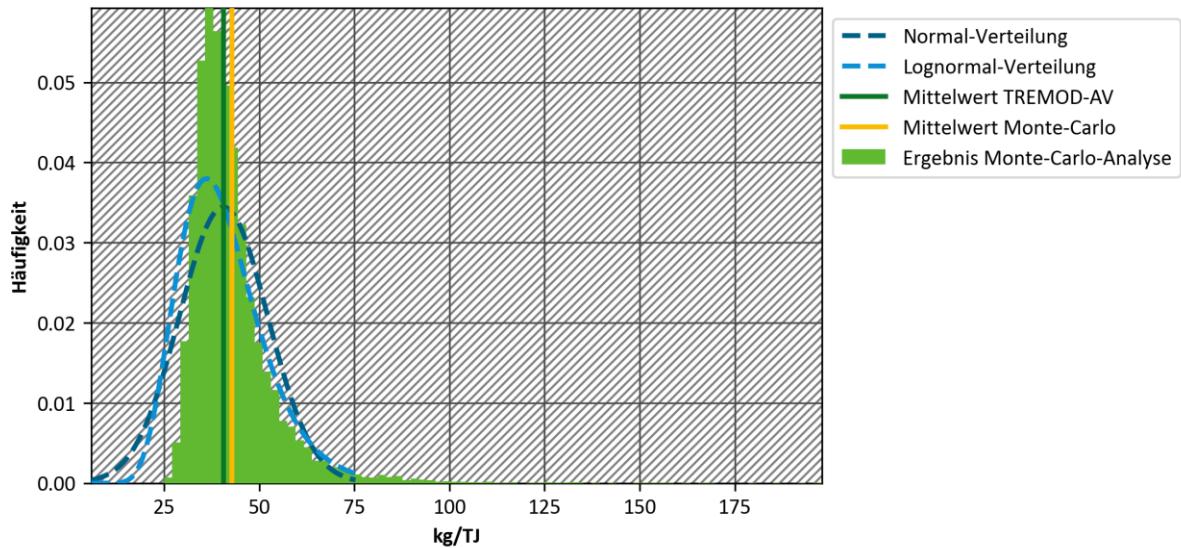


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 46: Verteilung NMVOC – LTO national Kerosin

National, LTO, Kerosin (K)

NMVOC | Normal(0.025, 0.975): 17.91kg/TJ, 63.32kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 22.58kg/TJ, 67.57kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

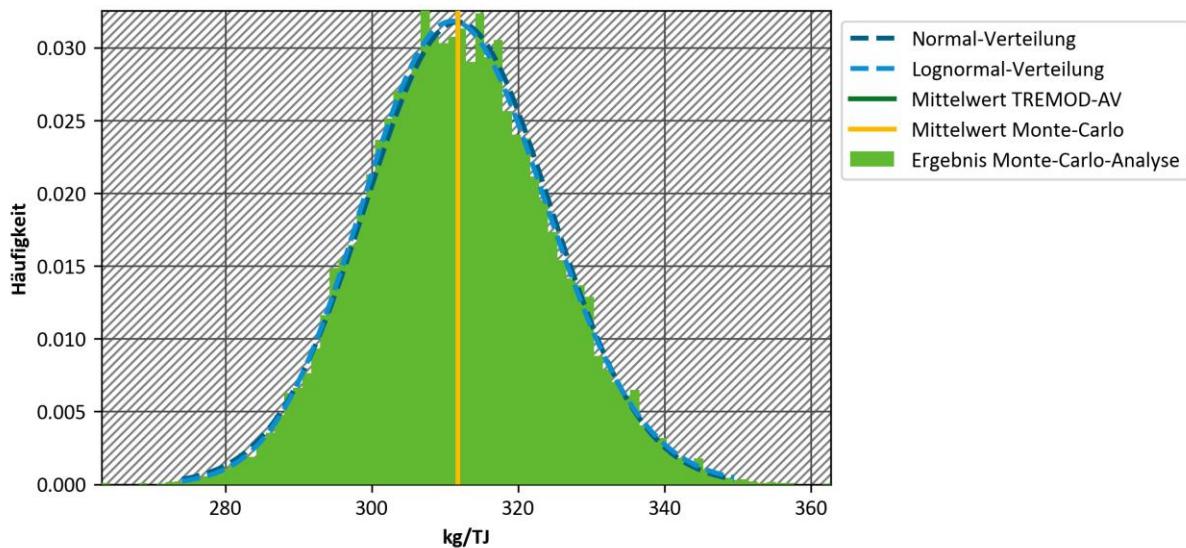


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 47: Verteilung NO_x – LTO national Kerosin

National, LTO, Kerosin (K)

NO_x | Normal(0.025, 0.975): 287.12kg/TJ, 336.37kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 287.85kg/TJ, 337.08kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

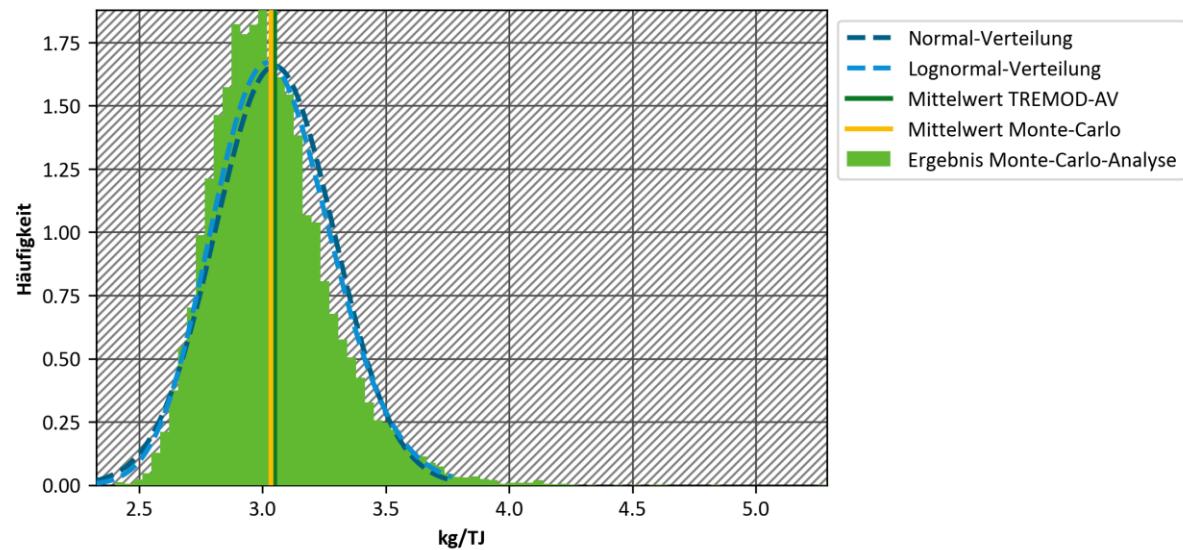


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 48: Verteilung PM – LTO national Kerosin

National, LTO, Kerosin (K)

PM | Normal(0.025, 0.975): 2.58kg/TJ, 3.52kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 2.60kg/TJ, 3.55kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

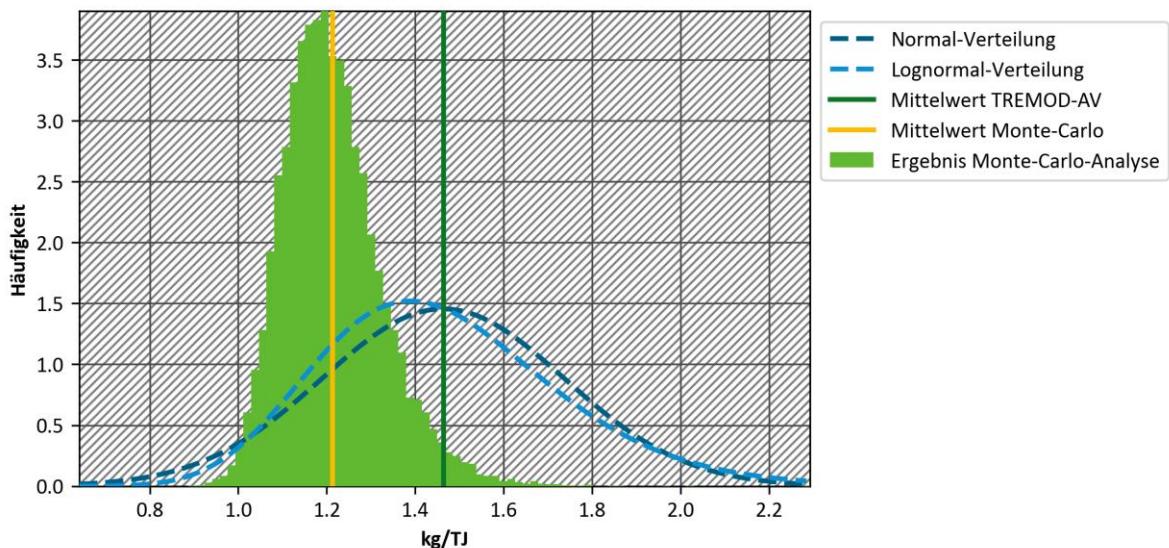


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 49: Verteilung BC – LTO national Kerosin

National, LTO, Kerosin (K)

BC | Normal(0.025, 0.975): 0.93kg/TJ, 2.00kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.00kg/TJ, 2.07kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

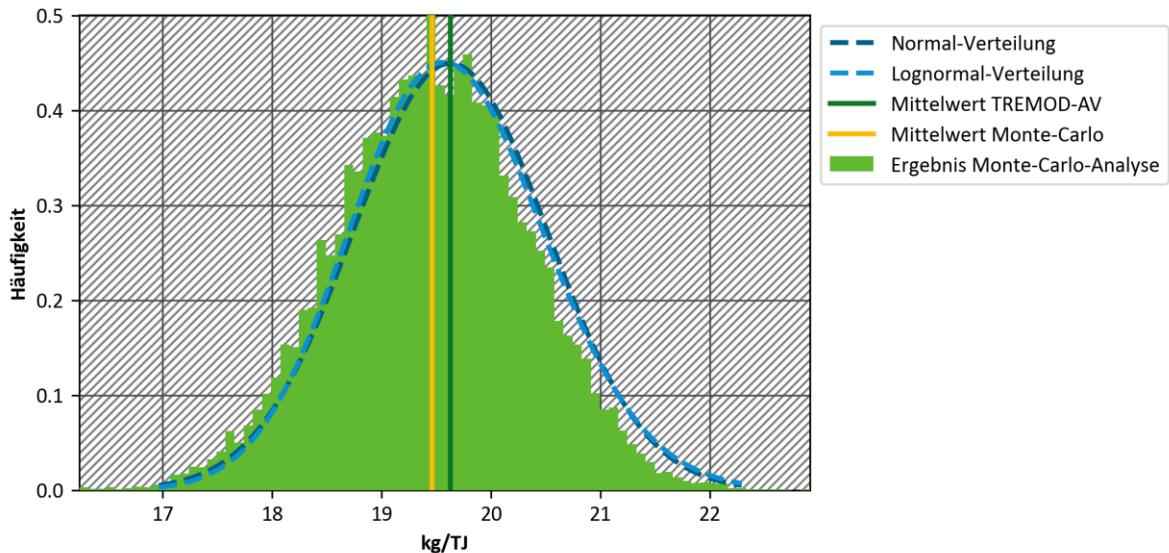


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 50: Verteilung SO₂ – LTO national Kerosin

National, LTO, Kerosin (K)

SO₂ | Normal(0.025, 0.975): 17.89kg/TJ, 21.37kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 17.94kg/TJ, 21.42kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

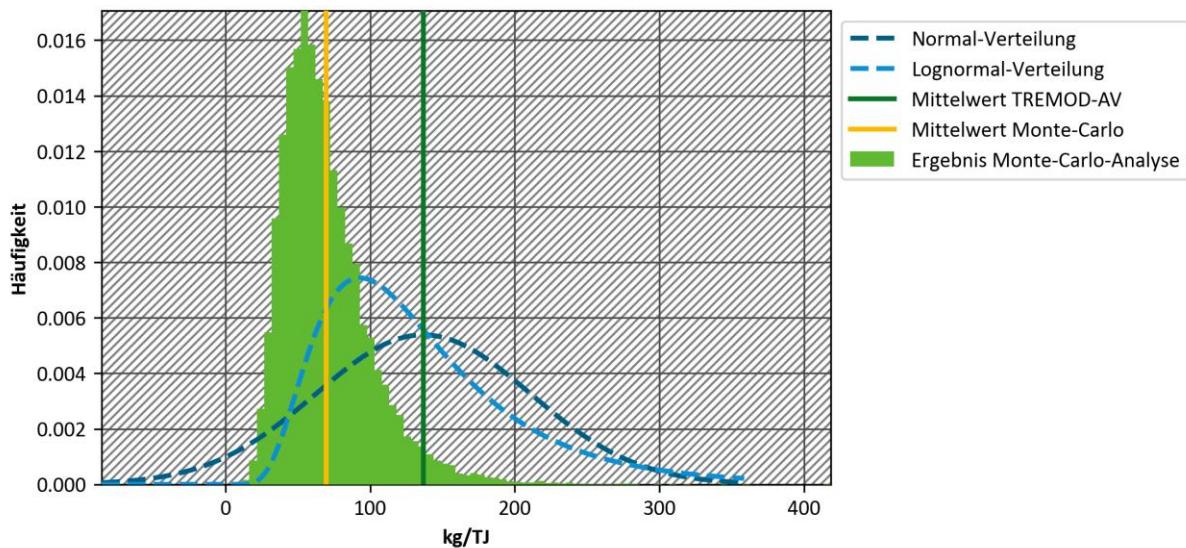


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 51: Verteilung CH₄ – LTO international Flugbenzin

International, LTO, Flugbenzin (BF)

CH₄ | Normal(0.025, 0.975): -8.47kg/TJ, 281.94kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 44.48kg/TJ, 324.96kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

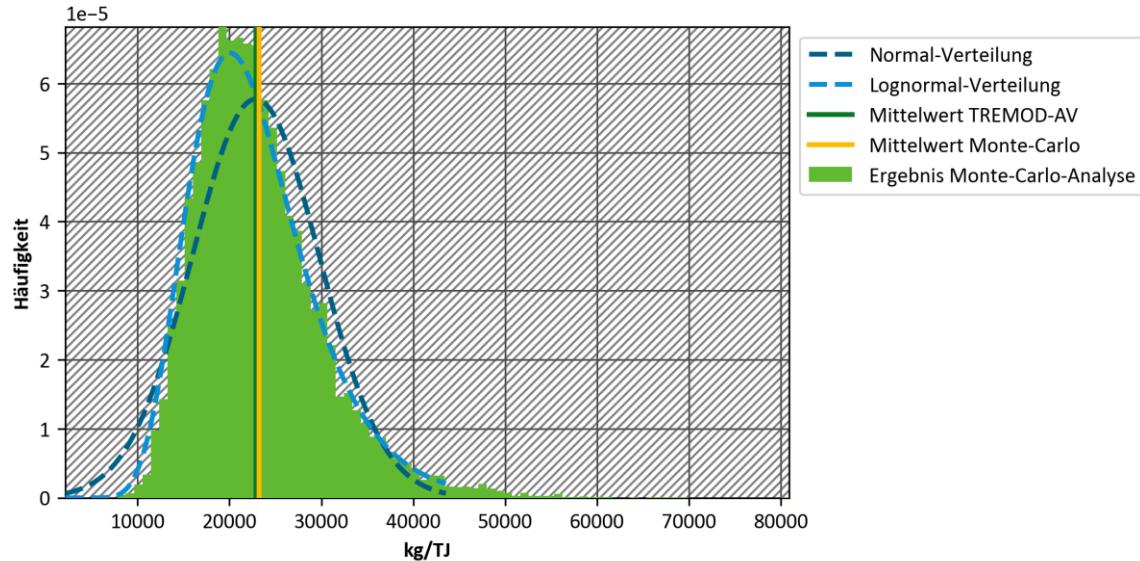


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 52: Verteilung CO – LTO international Flugbenzin

International, LTO, Flugbenzin (BF)

CO | Normal(0.025, 0.975): 9314.72kg/TJ, 36401.40kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 12255.66kg/TJ, 39062.87kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

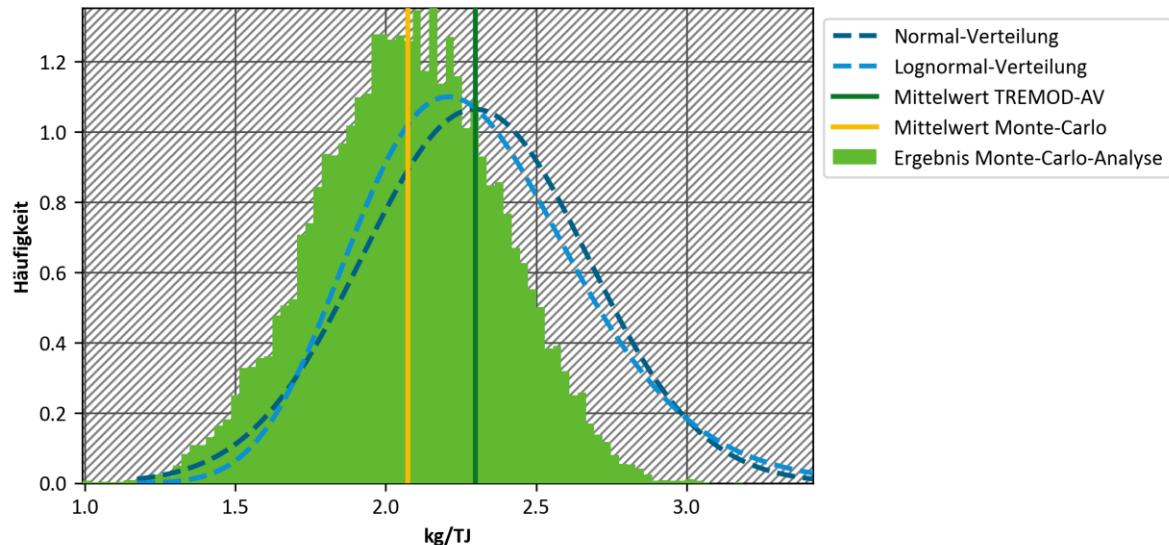


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 53: Verteilung N₂O – LTO international Flugbenzin

International, LTO, Flugbenzin (BF)

N₂O | Normal(0.025, 0.975): 1.56kg/TJ, 3.03kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.65kg/TJ, 3.11kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

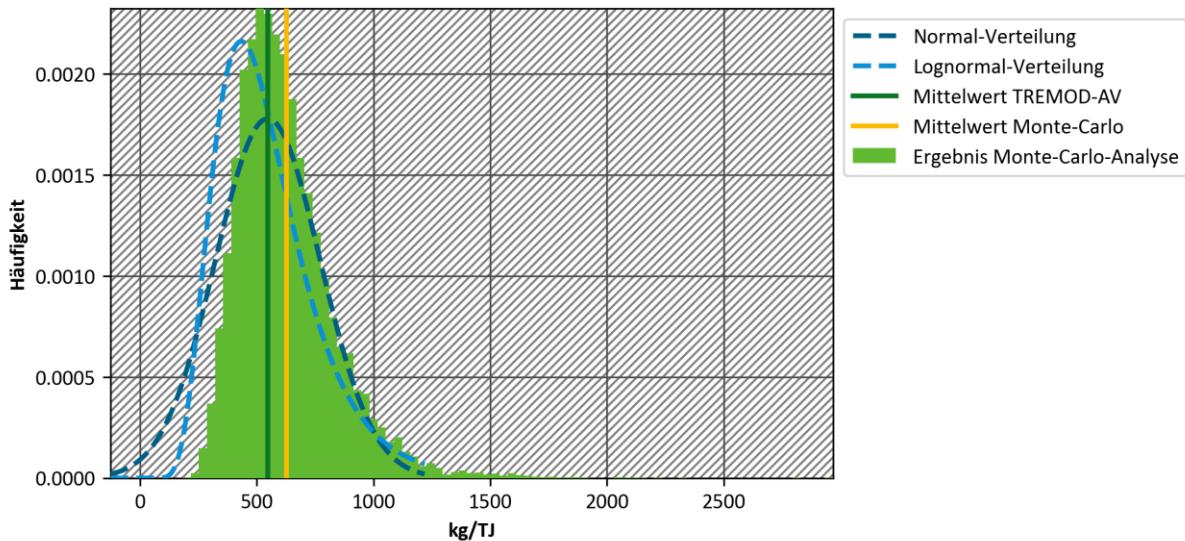


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 54: Verteilung NMVOC – LTO international Flugbenzin

International, LTO, Flugbenzin (BF)

NMVOC | Normal(0.025, 0.975): 107.20kg/TJ, 986.67kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 233.60kg/TJ, 1096.10kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

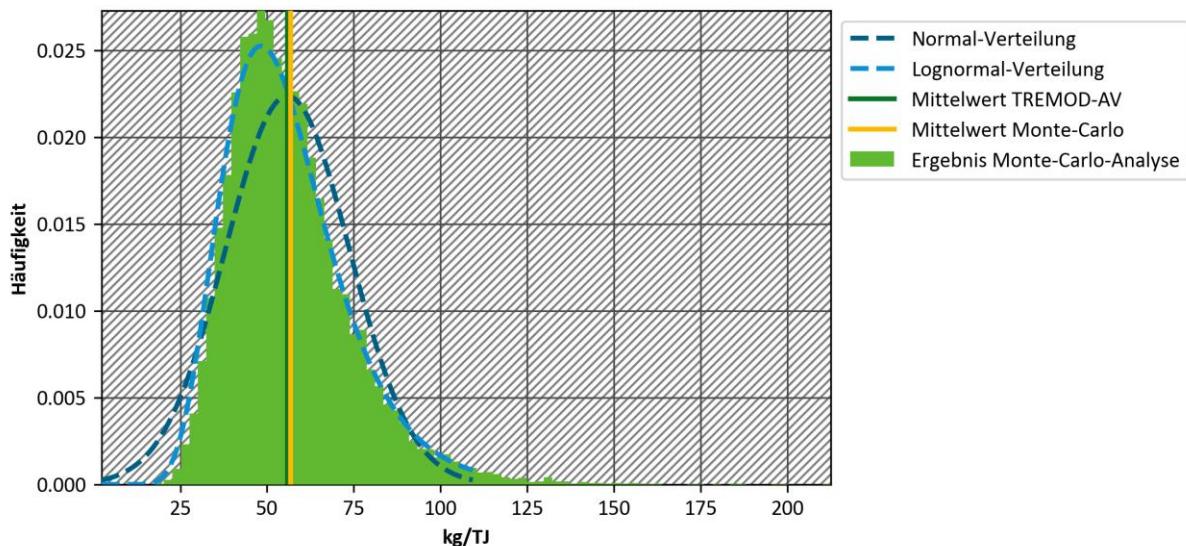


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 55: Verteilung NO_x – LTO international Flugbenzin

International, LTO, Flugbenzin (BF)

NO_x | Normal(0.025, 0.975): 20.87kg/TJ, 90.83kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 28.87kg/TJ, 98.03kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

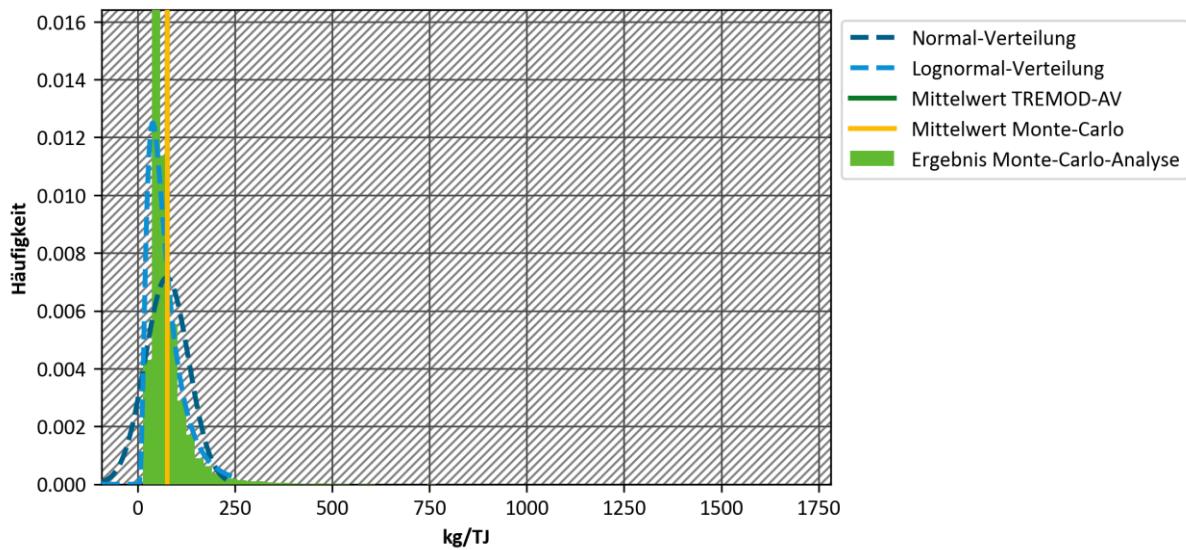


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 56: Verteilung PM – LTO international Flugbenzin

International, LTO, Flugbenzin (BF)

PM | Normal(0.025, 0.975): -34.75kg/TJ, 184.07kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 16.20kg/TJ, 220.75kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

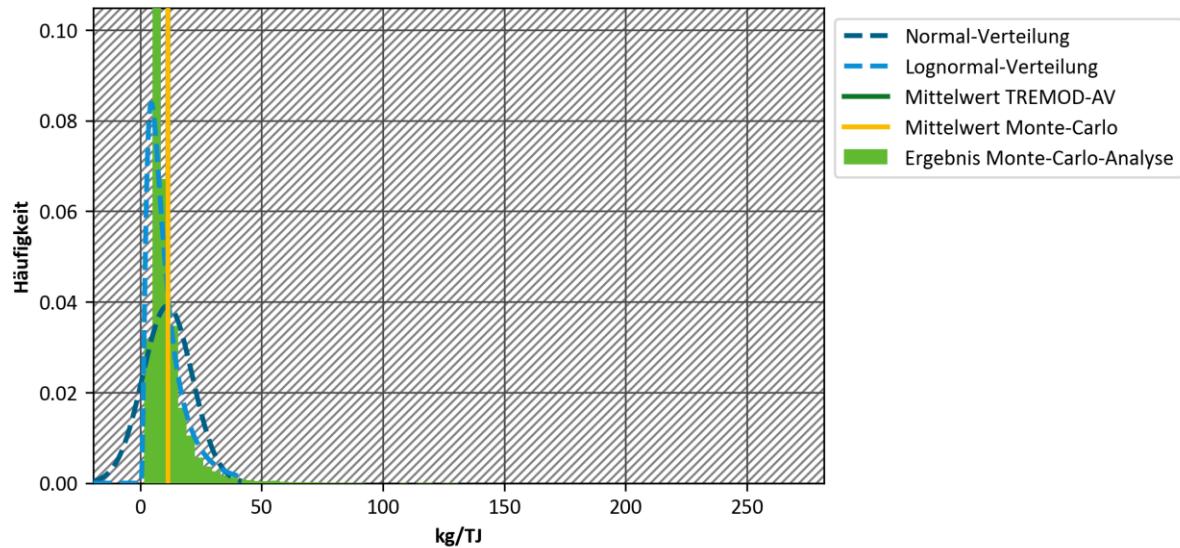


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 57: Verteilung BC – LTO international Flugbenzin

International, LTO, Flugbenzin (BF)

BC | Normal(0.025, 0.975): -8.79kg/TJ, 31.19kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.81kg/TJ, 37.98kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

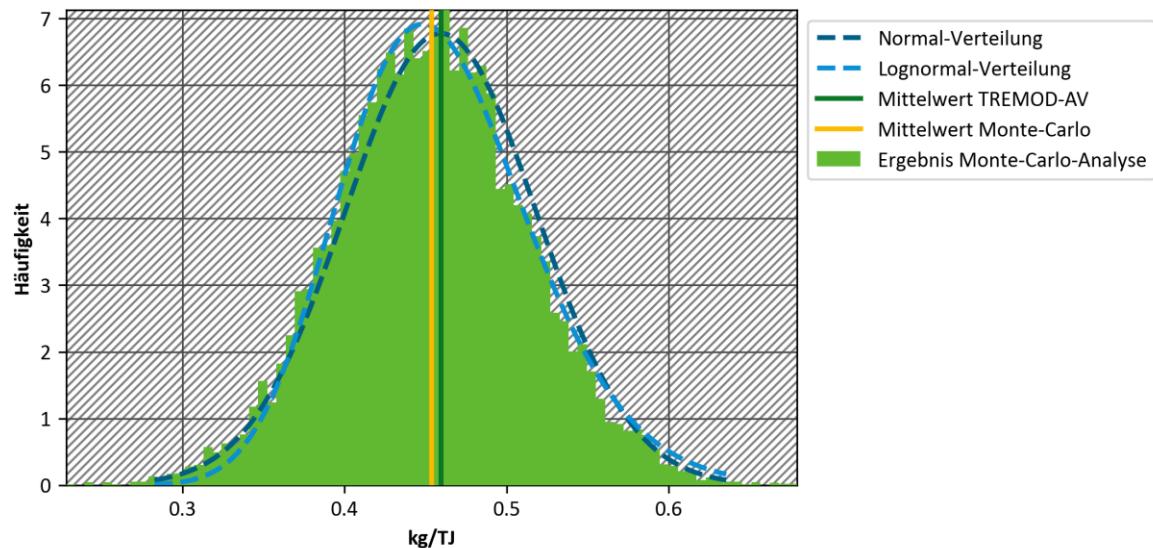


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 58: Verteilung SO₂ – LTO international Flugbenzin

International, LTO, Flugbenzin (BF)

SO₂ | Normal(0.025, 0.975): 0.34kg/TJ, 0.57kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 0.35kg/TJ, 0.59kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

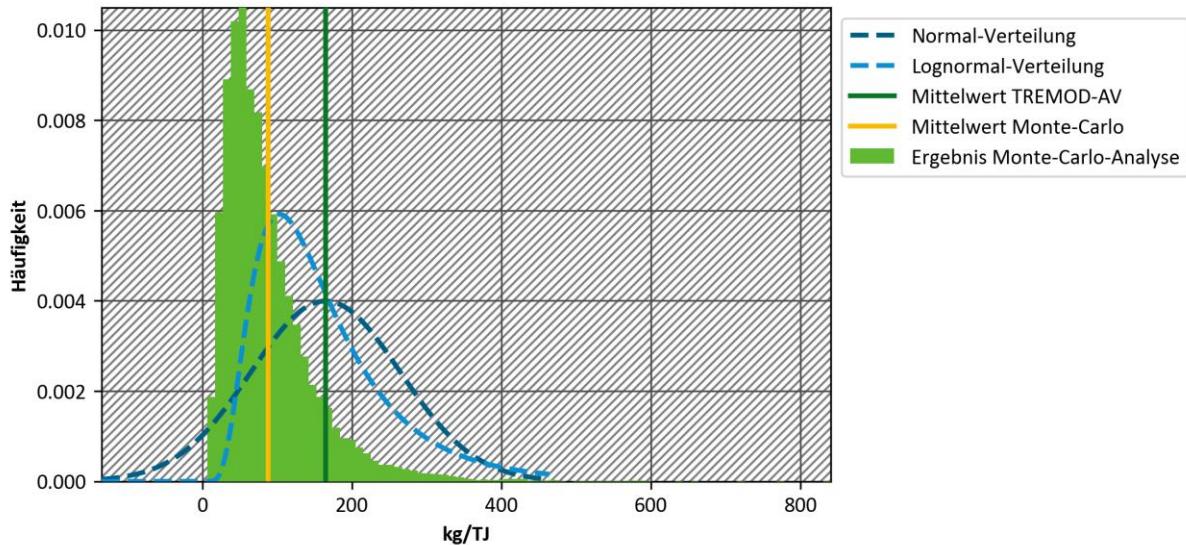


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 59: Verteilung CH₄ – LTO national Flugbenzin

National, LTO, Flugbenzin (BF)

CH₄ | Normal(0.025, 0.975): -30.88kg/TJ, 360.64kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 47.14kg/TJ, 421.88kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

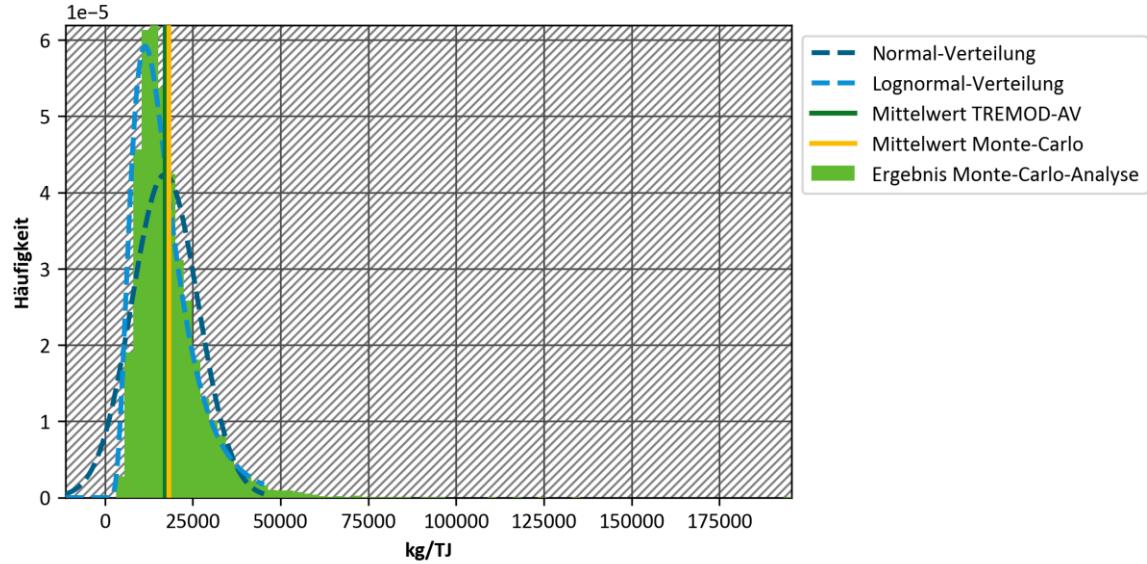


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 60: Verteilung CO – LTO national Flugbenzin

National, LTO, Flugbenzin (BF)

CO | Normal(0.025, 0.975): -1426.35kg/TJ, 35518.05kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 5420.93kg/TJ, 41050.47kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

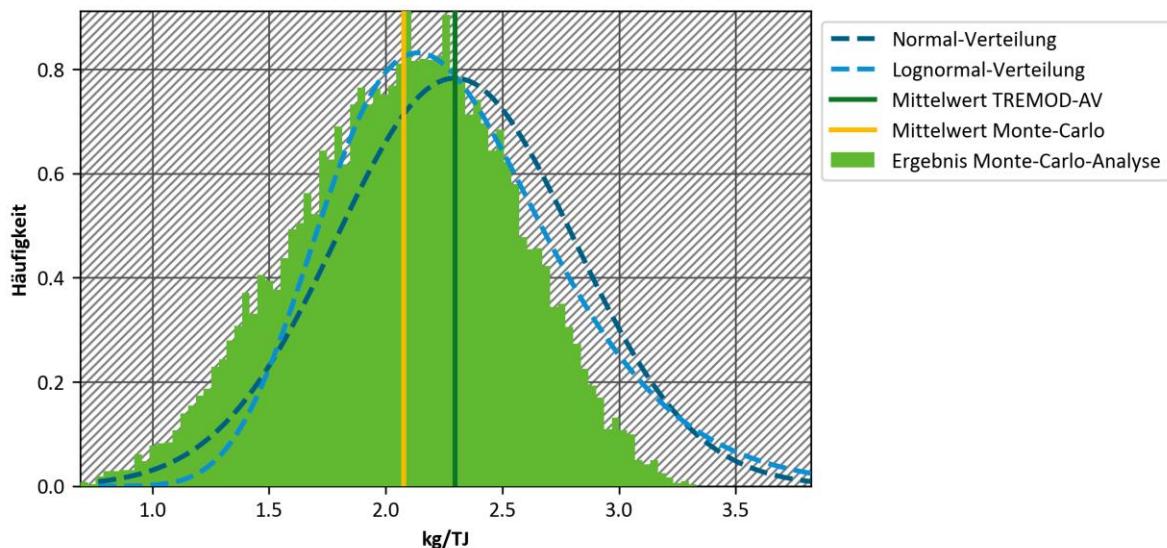


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 61: Verteilung N₂O – LTO national Flugbenzin

National, LTO, Flugbenzin (BF)

N₂O | Normal(0.025, 0.975): 1.30kg/TJ, 3.30kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.46kg/TJ, 3.45kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

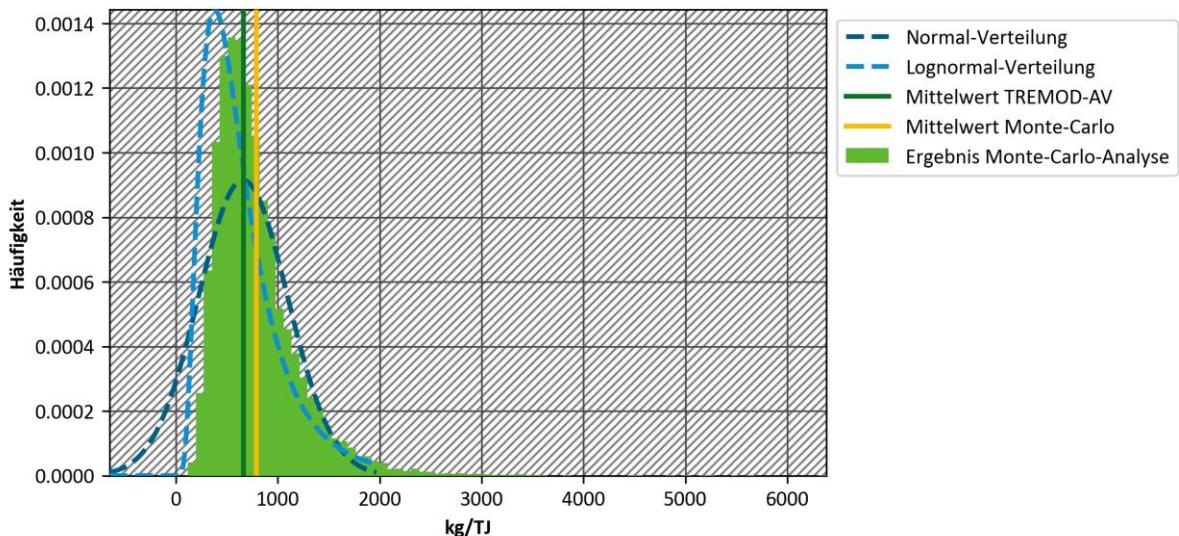


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 62: Verteilung NMVOC – LTO national Flugbenzin

National, LTO, Flugbenzin (BF)

NMVOC | Normal(0.025, 0.975): -195.50kg/TJ, 1514.53kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 168.90kg/TJ, 1791.46kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

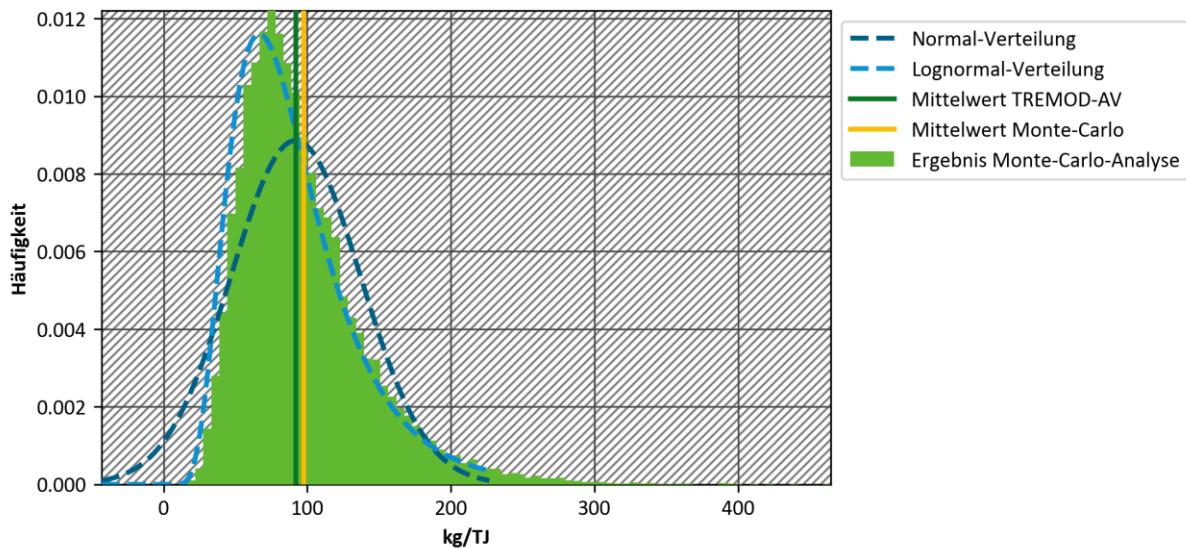


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 63: Verteilung NO_x – LTO national Flugbenzin

National, LTO, Flugbenzin (BF)

NO_x | Normal(0.025, 0.975): 3.69kg/TJ, 180.23kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 33.28kg/TJ, 204.92kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

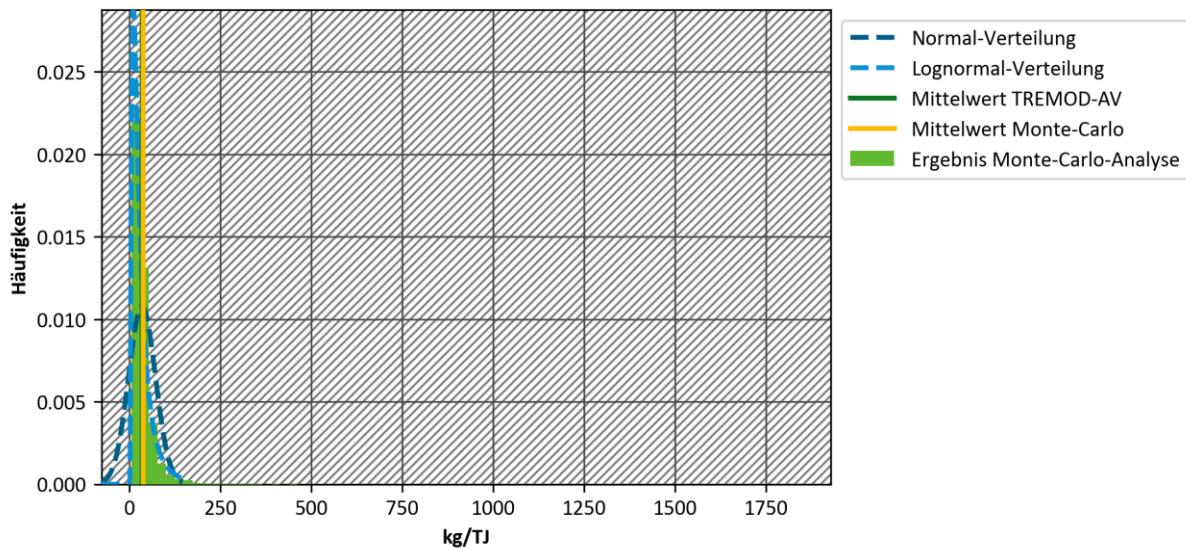


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 64: Verteilung PM – LTO national Flugbenzin

National, LTO, Flugbenzin (BF)

PM | Normal(0.025, 0.975): -38.31kg/TJ, 106.70kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 4.13kg/TJ, 130.31kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

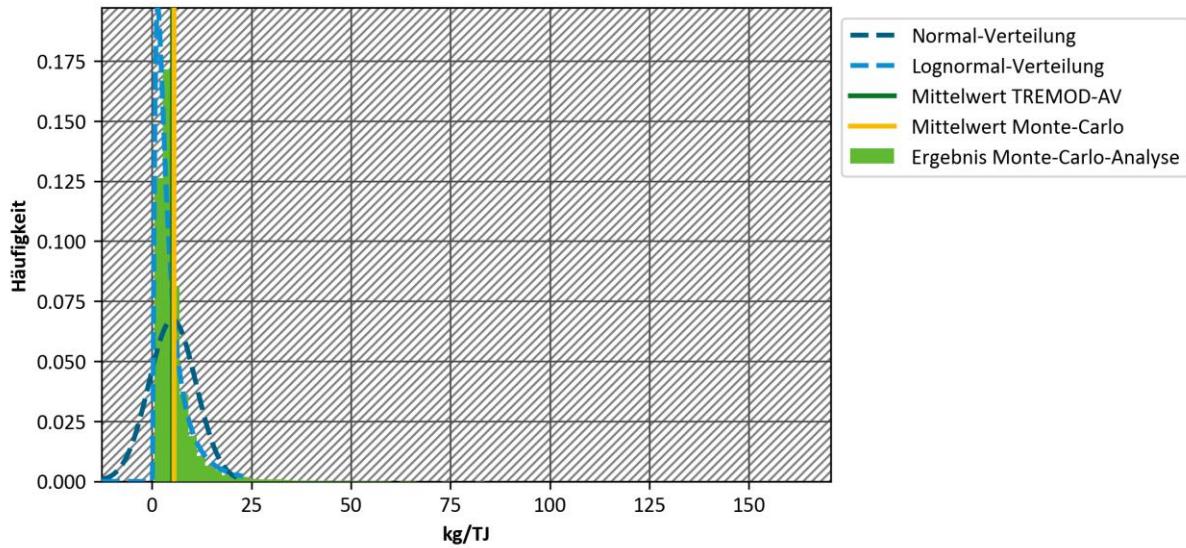


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 65: Verteilung BC – LTO national Flugbenzin

National, LTO, Flugbenzin (BF)

BC | Normal(0.025, 0.975): -6.50kg/TJ, 16.75kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 0.55kg/TJ, 20.42kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

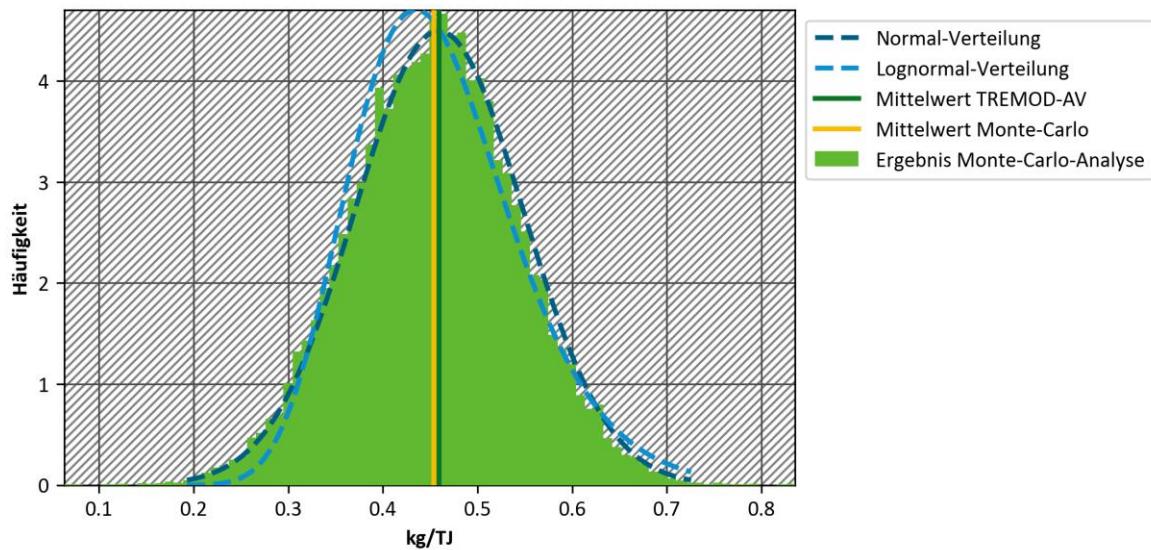


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 66: Verteilung SO₂ – LTO national Flugbenzin

National, LTO, Flugbenzin (BF)

SO₂ | Normal(0.025, 0.975): 0.29kg/TJ, 0.63kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 0.31kg/TJ, 0.66kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung



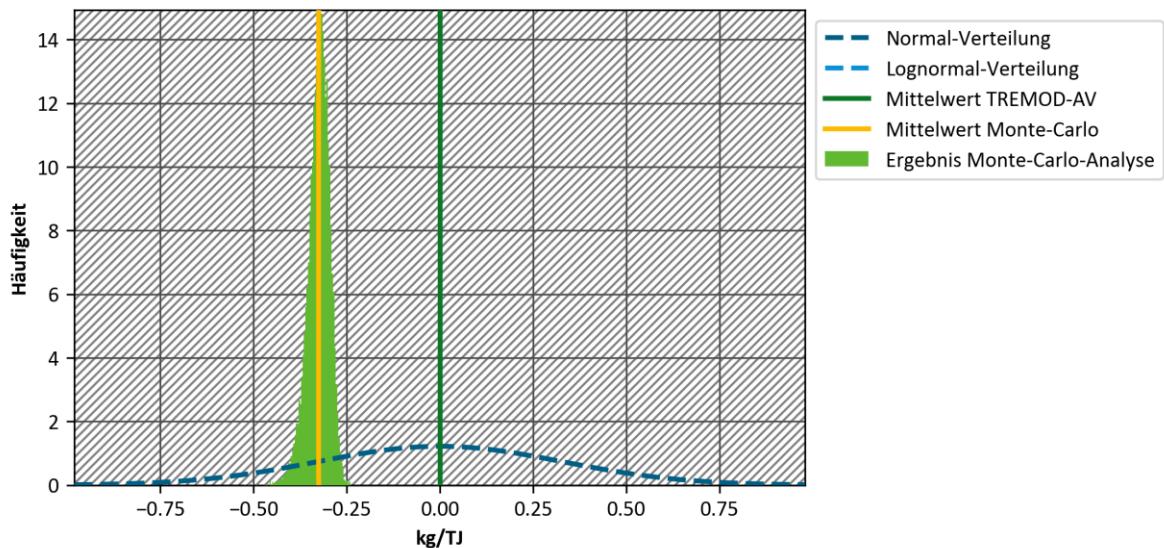
Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

B.2 Verteilungsfunktionen der Emissionsfaktoren der CCD-Phase und deren Parameter

Abbildung 67: Verteilung CH₄ – CCD international Kerosin

International, CCD, Kerosin (K)

CH₄ | Normal(0.025, 0.975): -0.64kg/TJ, 0.64kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): nankg/TJ, nankg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

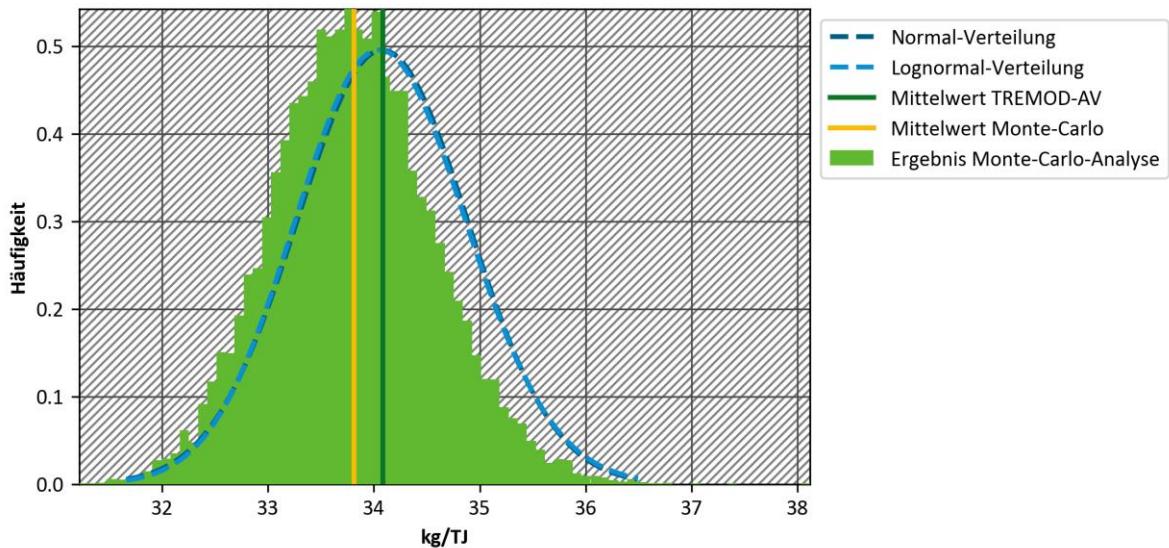


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 68: Verteilung CO – CCD international Kerosin

International, CCD, Kerosin (K)

CO | Normal(0.025, 0.975): 32.50kg/TJ, 35.66kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 32.53kg/TJ, 35.69kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

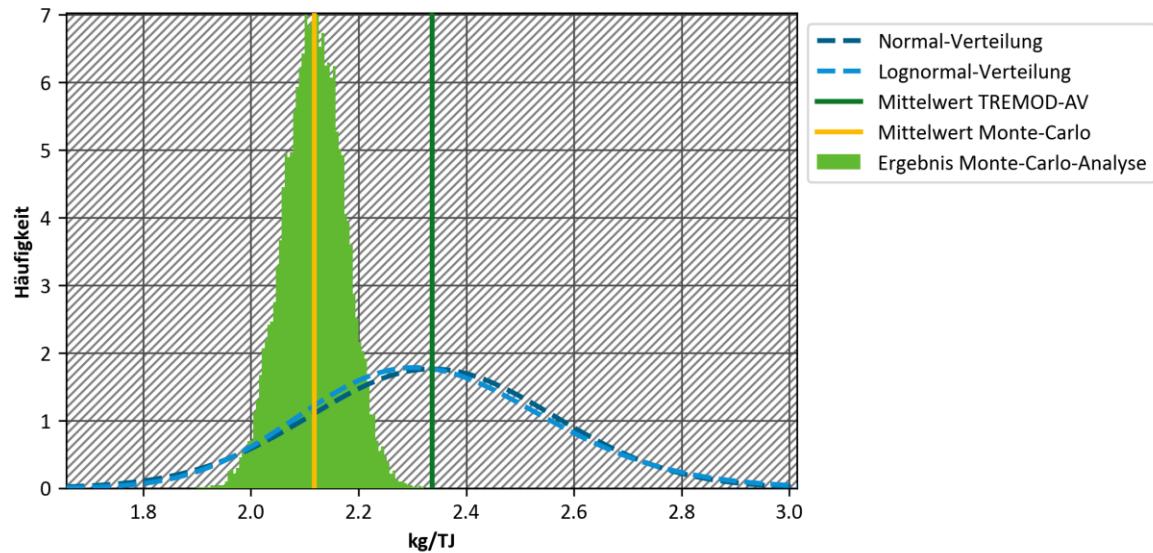


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 69: Verteilung N₂O – CCD international Kerosin

International, CCD, Kerosin (K)

N₂O | Normal(0.025, 0.975): 1.89kg/TJ, 2.78kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.92kg/TJ, 2.81kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

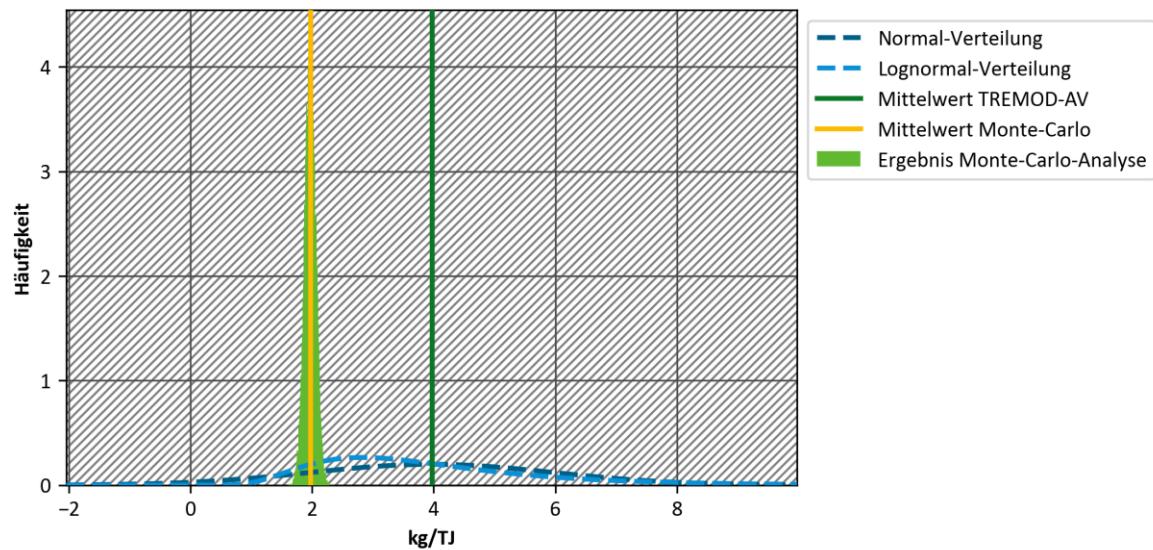


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 70: Verteilung NH₃ – CCD international Kerosin

International, CCD, Kerosin (K)

NH₃ | Normal(0.025, 0.975): 0.04kg/TJ, 7.90kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.39kg/TJ, 9.02kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

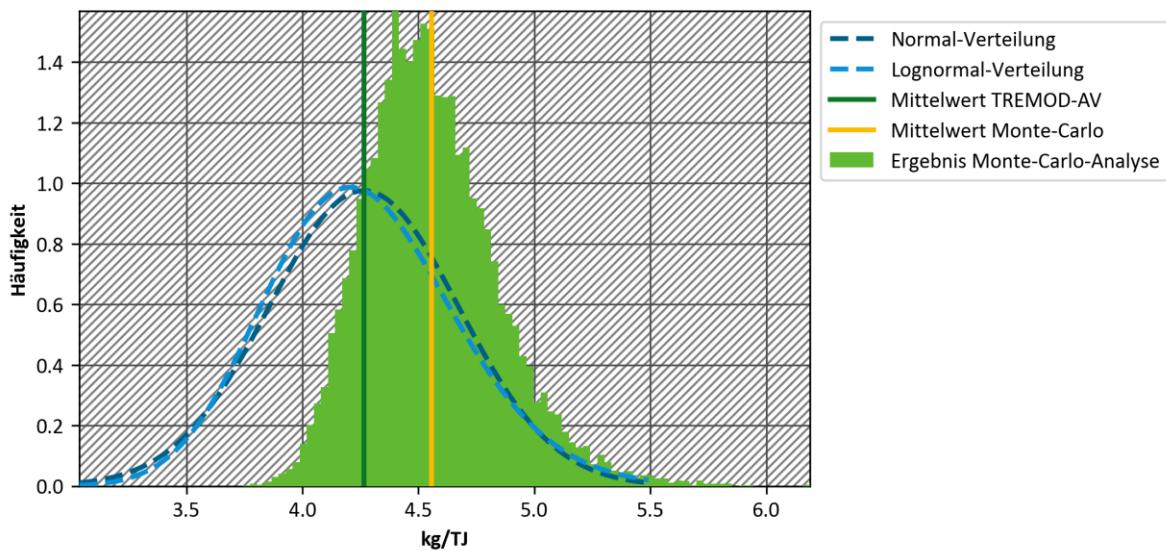


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 71: Verteilung NMVOC – CCD international Kerosin

International, CCD, Kerosin (K)

NMVOC | Normal(0.025, 0.975): 3.46kg/TJ, 5.07kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 3.52kg/TJ, 5.12kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

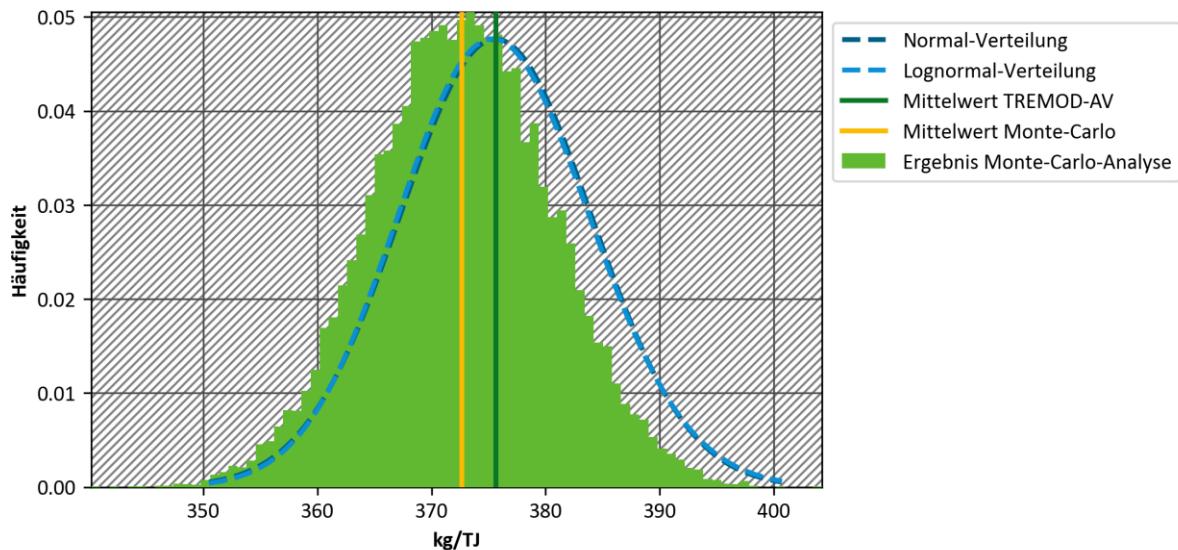


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 72: Verteilung NO_x – CCD international Kerosin

International, CCD, Kerosin (K)

NO_x | Normal(0.025, 0.975): 359.21kg/TJ, 392.03kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 359.48kg/TJ, 392.30kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

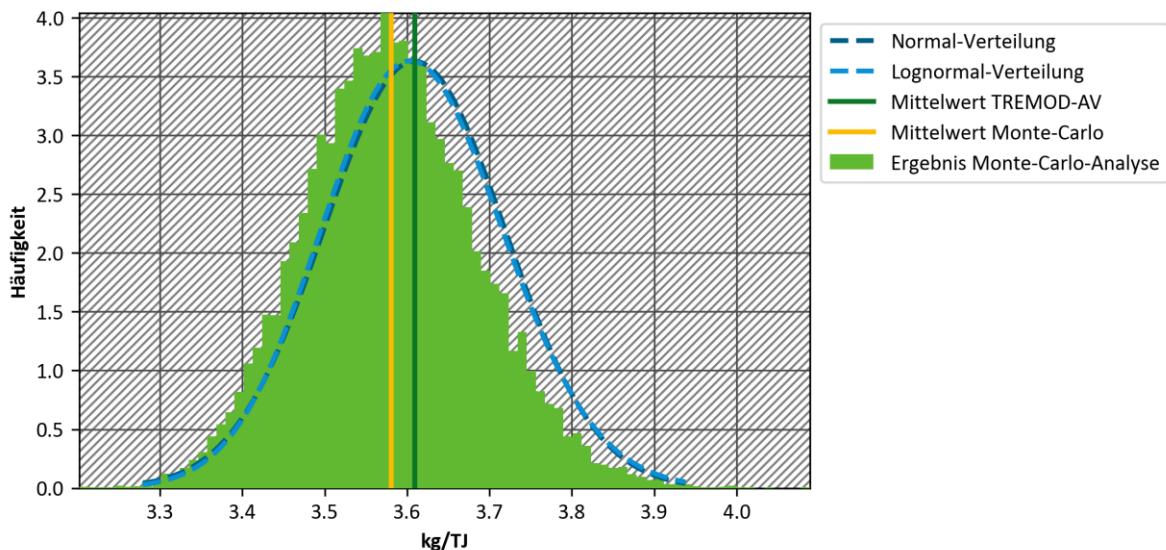


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 73: Verteilung PM – CCD international Kerosin

International, CCD, Kerosin (K)

PM | Normal(0.025, 0.975): 3.39kg/TJ, 3.82kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 3.40kg/TJ, 3.83kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

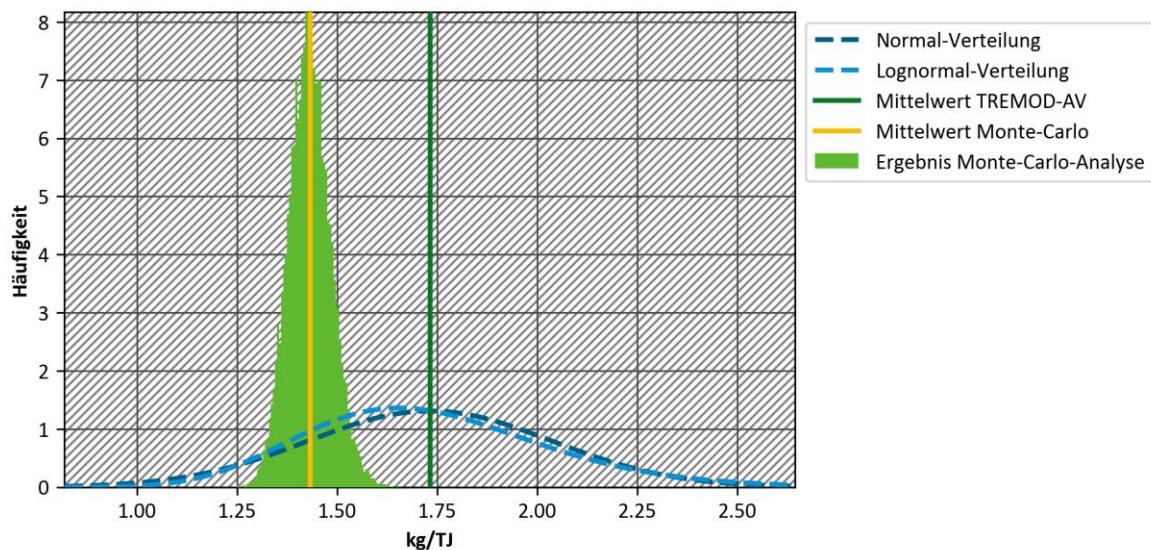


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 74: Verteilung BC – CCD international Kerosin

International, CCD, Kerosin (K)

BC | Normal(0.025, 0.975): 1.14kg/TJ, 2.33kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.21kg/TJ, 2.40kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

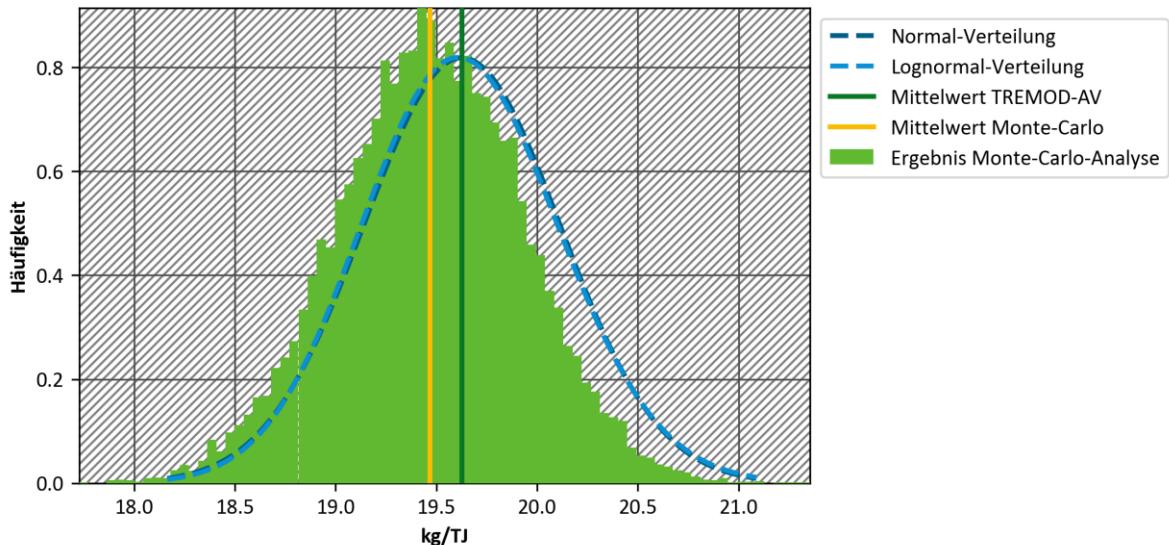


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 75: Verteilung SO₂ – CCD international Kerosin

International, CCD, Kerosin (K)

SO₂ | Normal(0.025, 0.975): 18.67kg/TJ, 20.58kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 18.69kg/TJ, 20.60kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

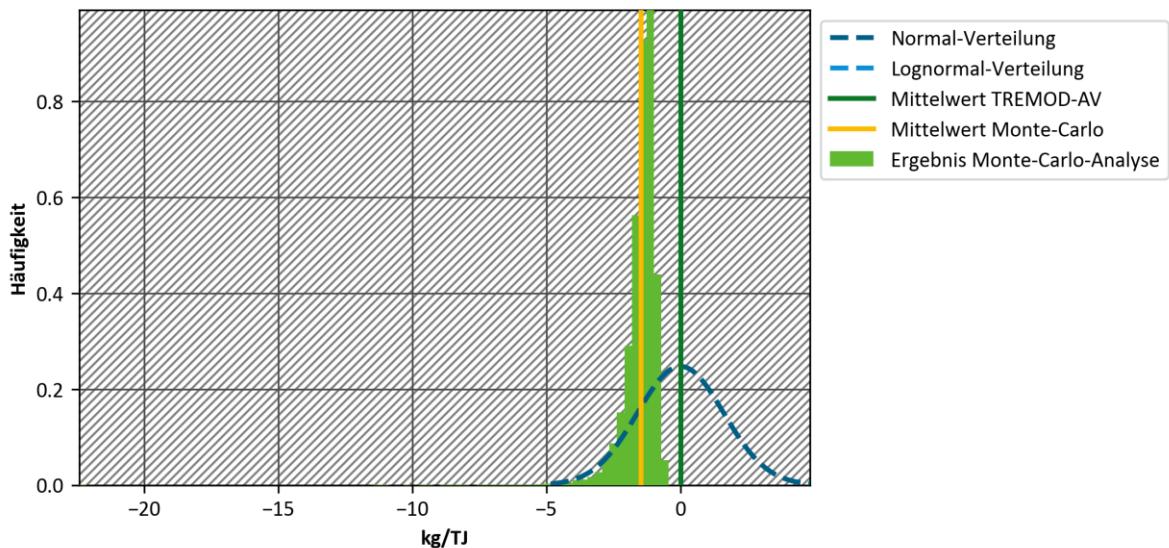


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 76: Verteilung CH₄ – CCD national Kerosin

National, CCD, Kerosin (K)

CH₄ | Normal(0.025, 0.975): -3.16kg/TJ, 3.16kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): nankg/TJ, nankg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

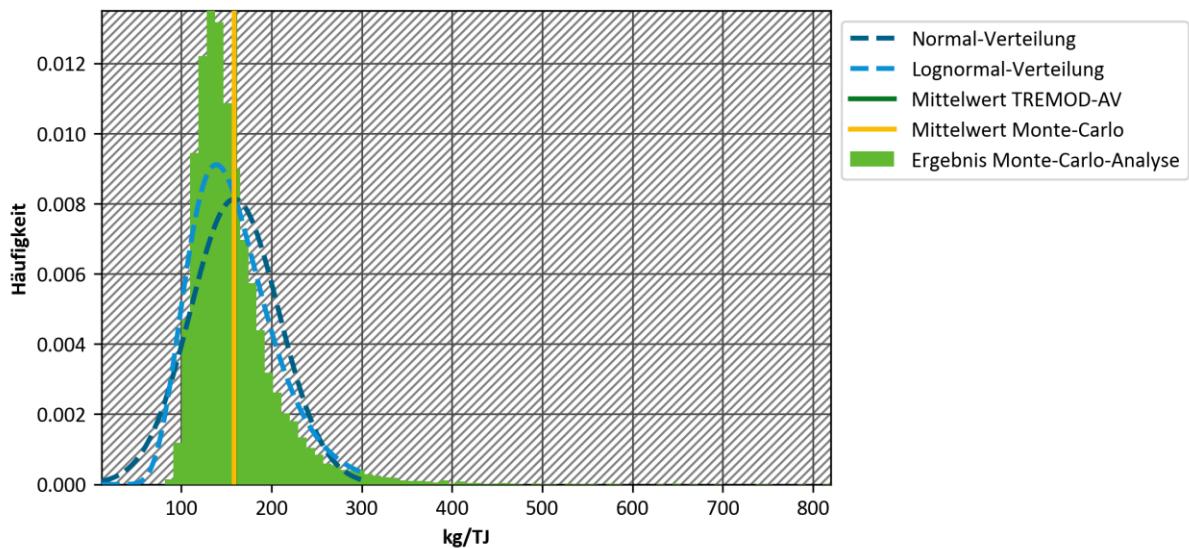


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 77: Verteilung CO – CCD national Kerosin

National, CCD, Kerosin (K)

CO | Normal(0.025, 0.975): 62.81kg/TJ, 255.19kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 84.11kg/TJ, 274.42kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

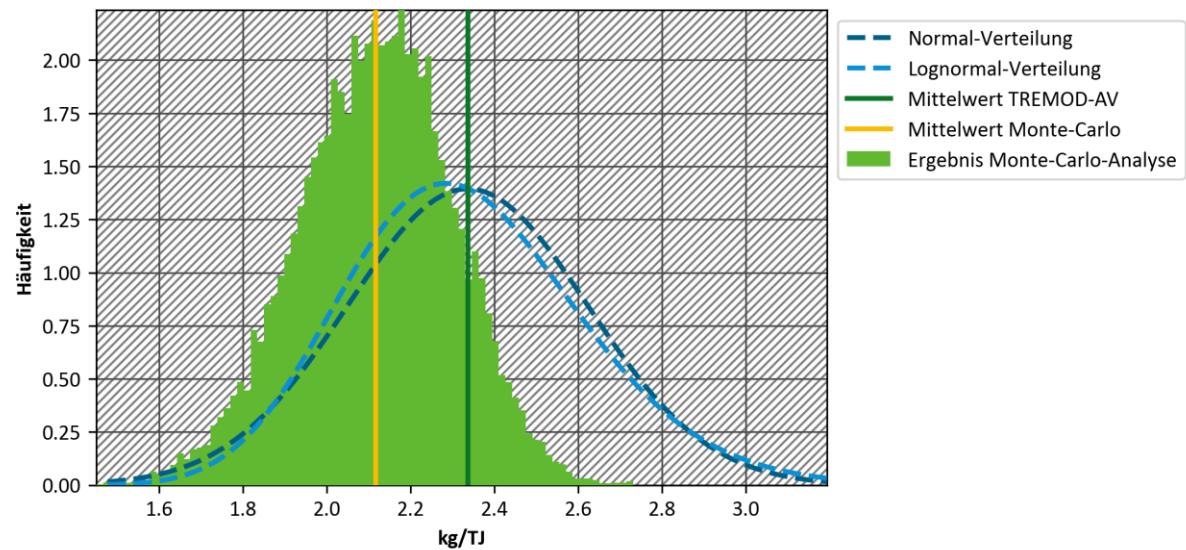


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 78: Verteilung N₂O – CCD national Kerosin

National, CCD, Kerosin (K)

N₂O | Normal(0.025, 0.975): 1.78kg/TJ, 2.90kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.83kg/TJ, 2.95kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

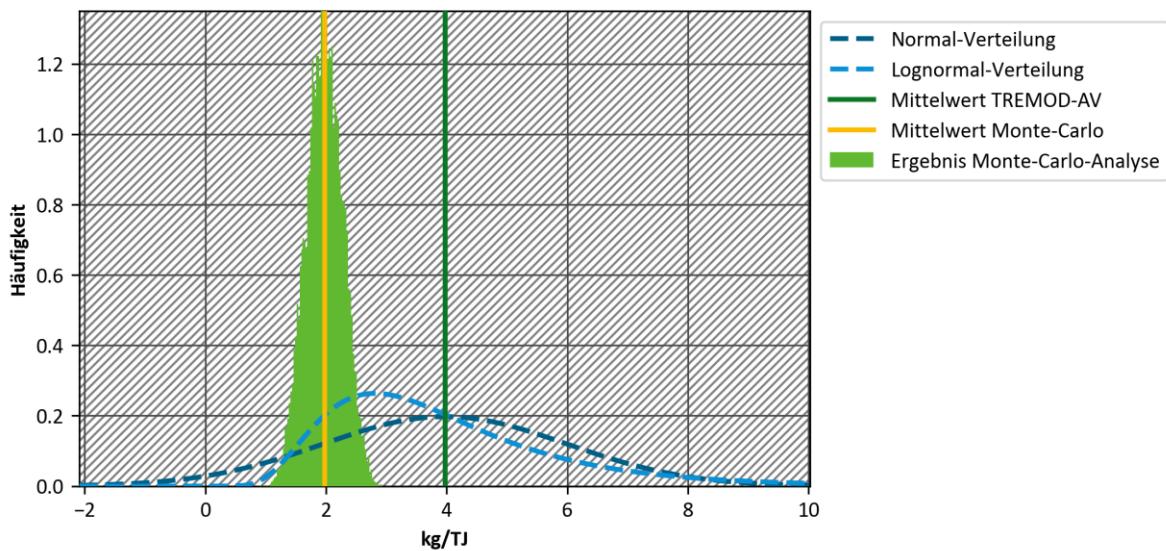


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 79: Verteilung NH₃ – CCD national Kerosin

National, CCD, Kerosin (K)

NH₃ | Normal(0.025, 0.975): 0.01kg/TJ, 7.93kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.38kg/TJ, 9.07kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

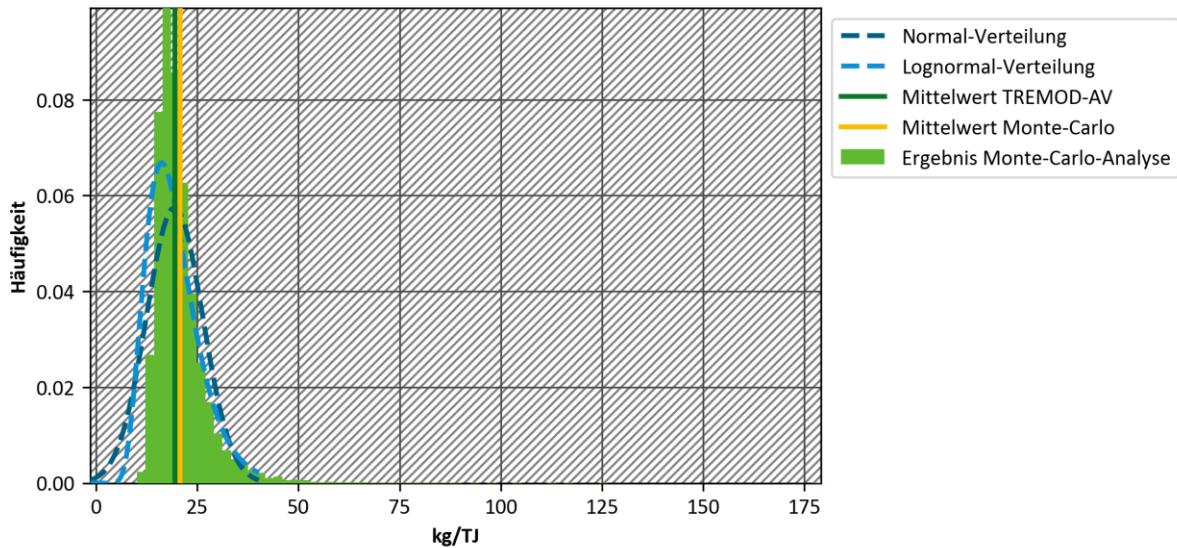


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 80: Verteilung NMVOC – CCD national Kerosin

National, CCD, Kerosin (K)

NMVOC | Normal(0.025, 0.975): 5.78kg/TJ, 33.00kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 9.24kg/TJ, 36.06kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

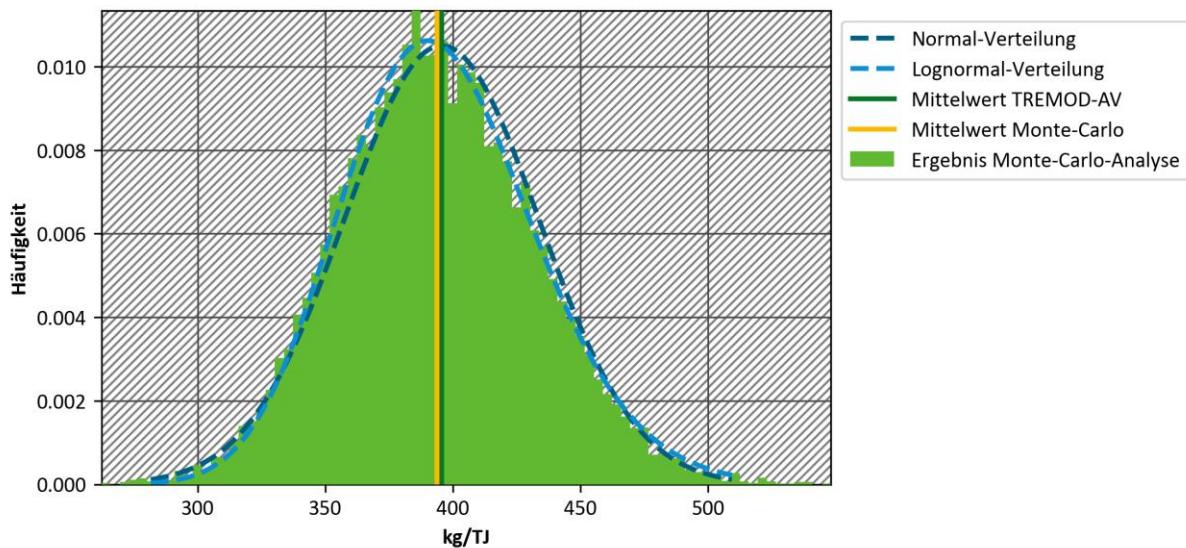


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 81: Verteilung NO_x – CCD national Kerosin

National, CCD, Kerosin (K)

NO_x | Normal(0.025, 0.975): 321.10kg/TJ, 470.05kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 326.33kg/TJ, 475.12kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

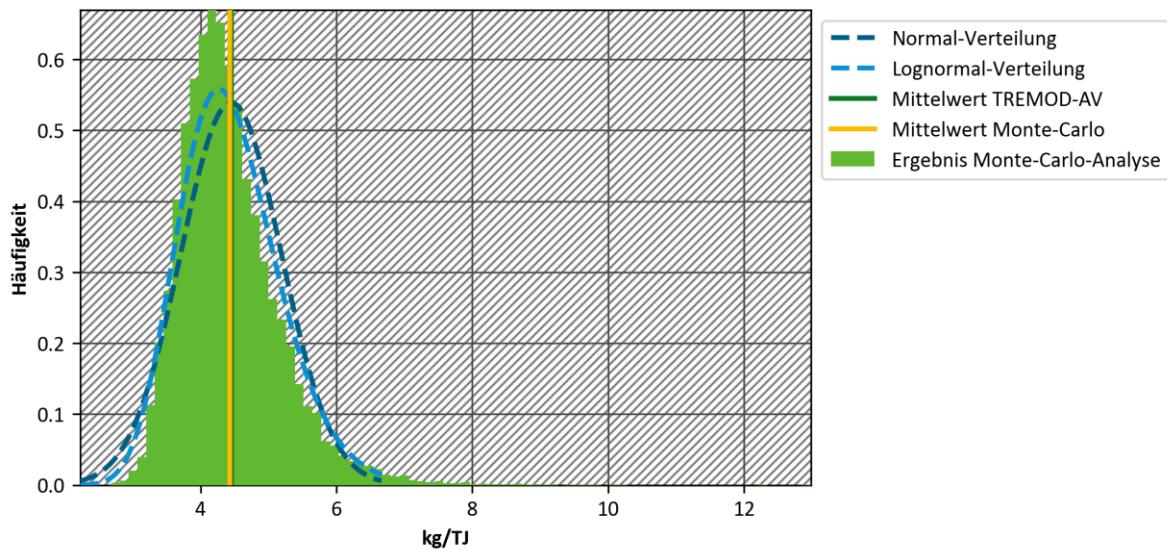


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 82: Verteilung PM – CCD national Kerosin

National, CCD, Kerosin (K)

PM | Normal(0.025, 0.975): 3.00kg/TJ, 5.90kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 3.17kg/TJ, 6.07kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

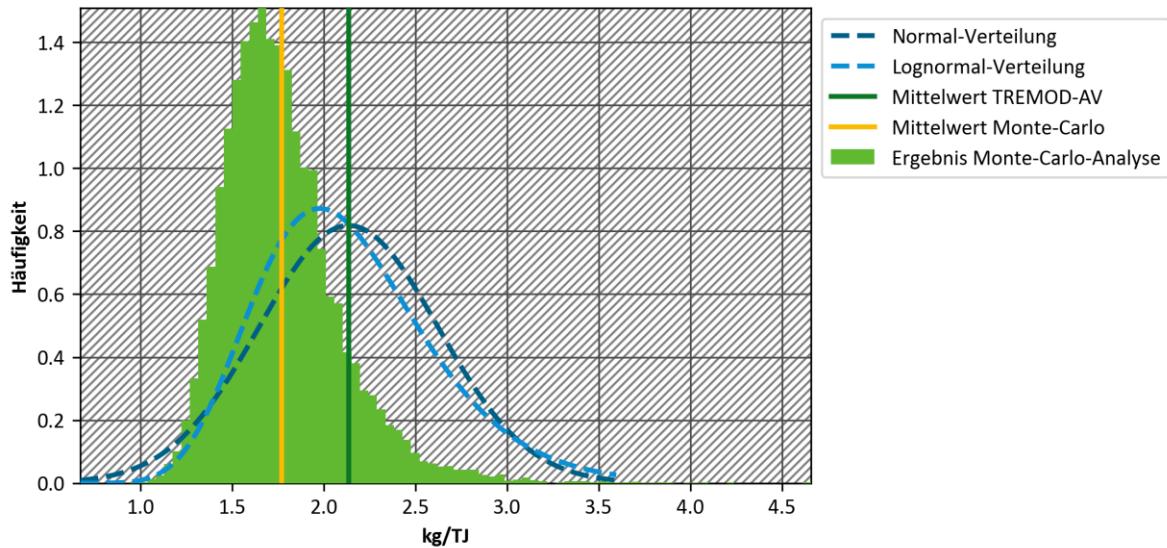


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 83: Verteilung BC – CCD national Kerosin

National, CCD, Kerosin (K)

BC | Normal(0.025, 0.975): 1.18kg/TJ, 3.09kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.34kg/TJ, 3.24kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

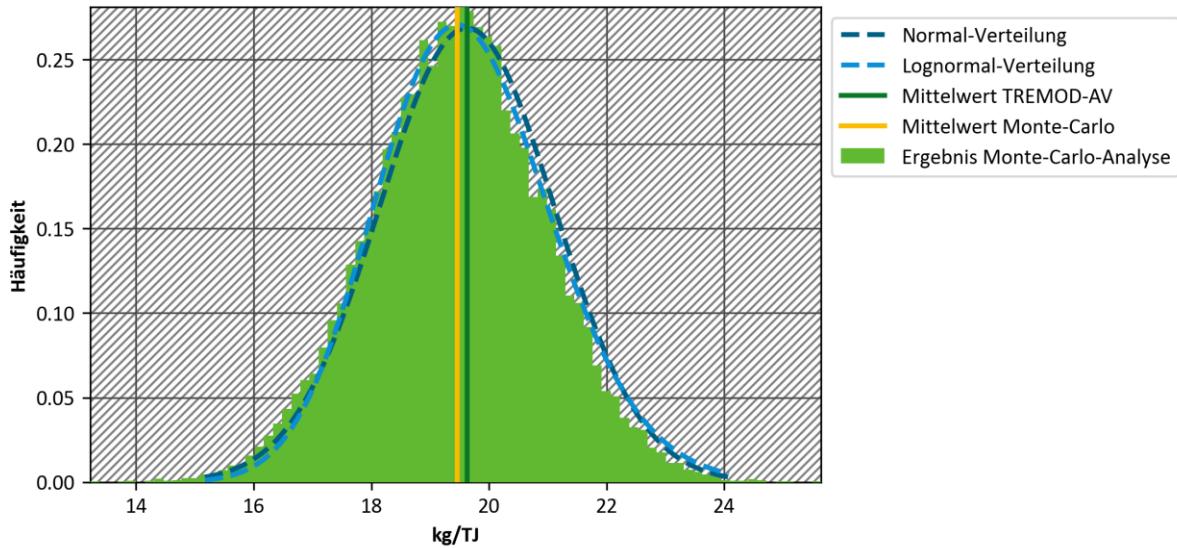


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 84: Verteilung SO₂ – CCD national Kerosin (K)

National, CCD, Kerosin (K)

SO₂ | Normal(0.025, 0.975): 16.72kg/TJ, 22.54kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 16.88kg/TJ, 22.69kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

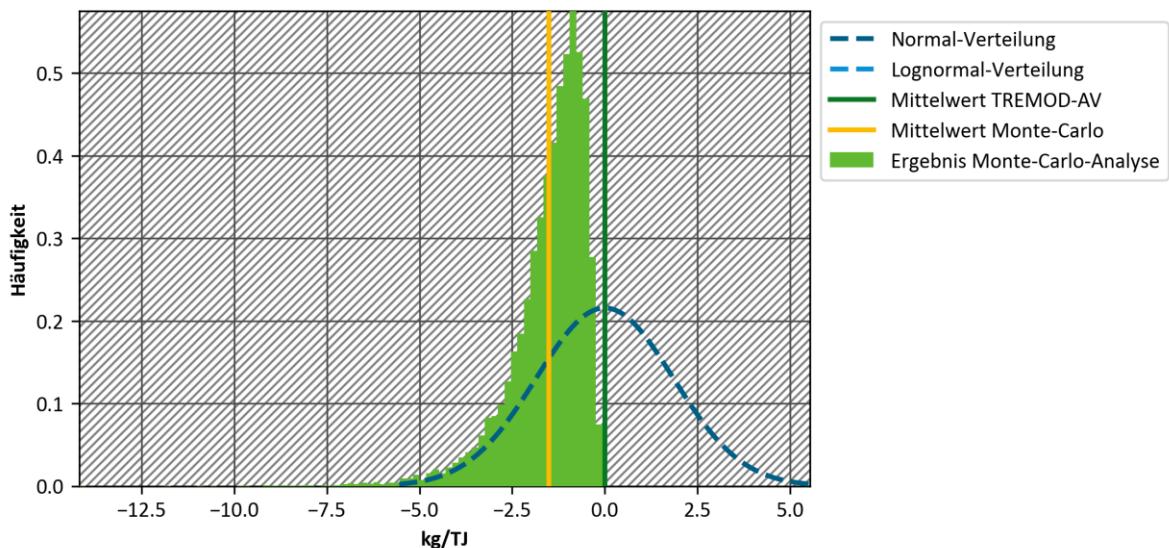


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 85: Verteilung CH₄ – CCD international Flugbenzin

International, CCD, Flugbenzin (BF)

CH4 | Normal(0.025, 0.975): -3.63kg/TJ, 3.63kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): nankg/TJ, nankg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

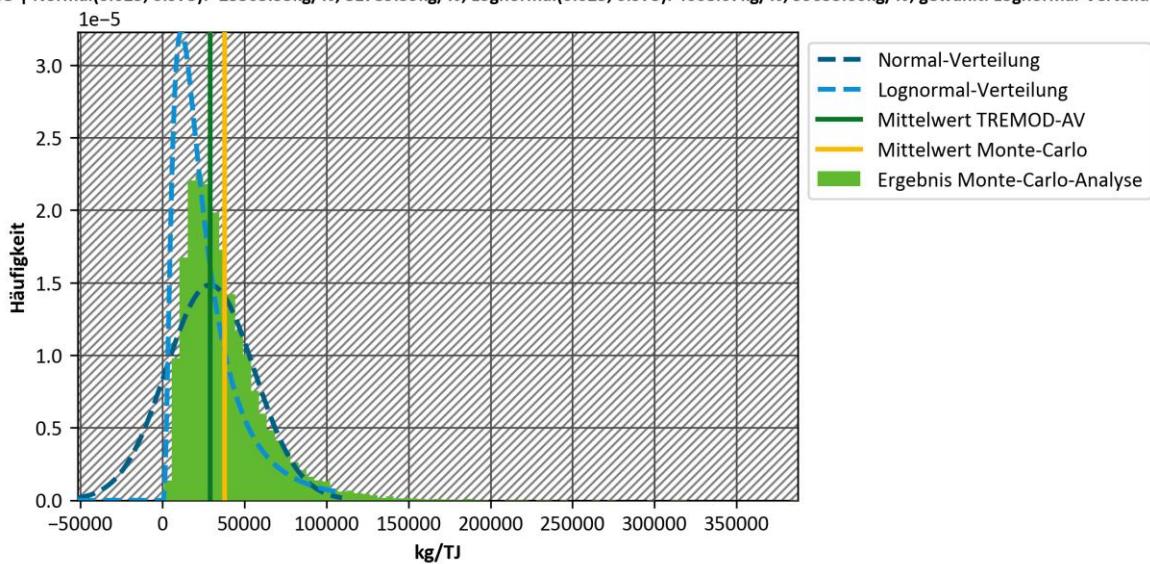


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 86: Verteilung CO – CCD international Flugbenzin

International, CCD, Flugbenzin (BF)

CO | Normal(0.025, 0.975): -23503.33kg/TJ, 81789.39kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 4608.07kg/TJ, 99653.60kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

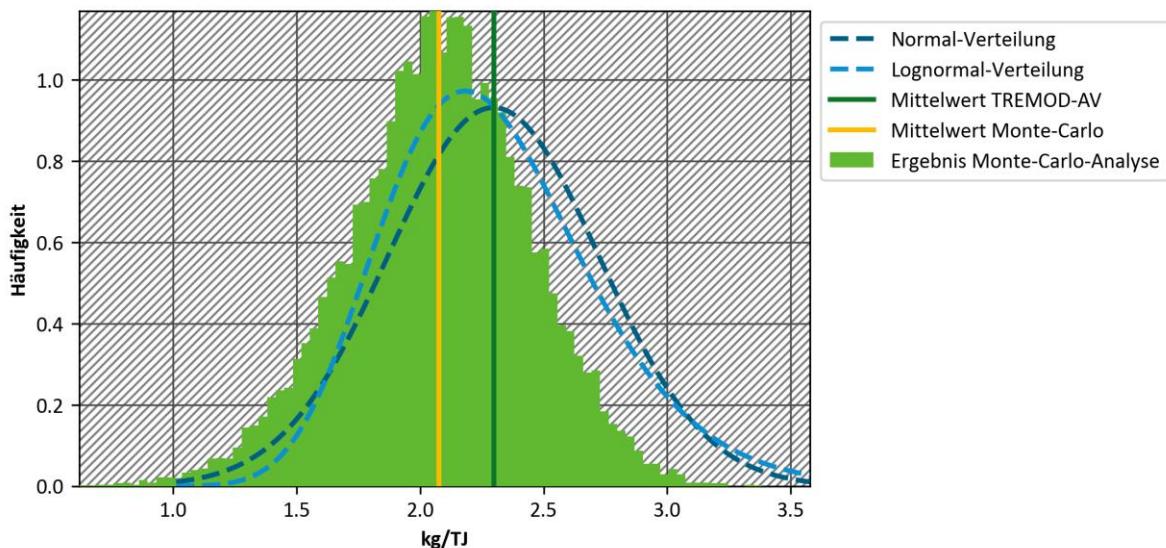


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 87: Verteilung N₂O – CCD international Flugbenzin

International, CCD, Flugbenzin (BF)

N₂O | Normal(0.025, 0.975): 1.46kg/TJ, 3.14kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.57kg/TJ, 3.24kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

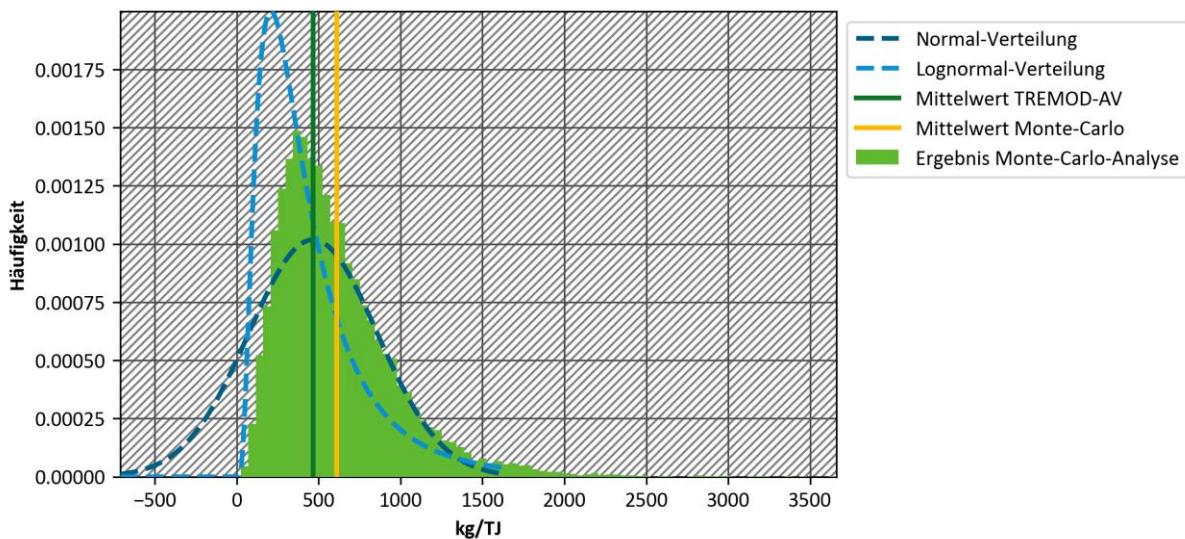


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 88: Verteilung NMVOC – CCD international Flugbenzin

International, CCD, Flugbenzin (BF)

NMVOC | Normal(0.025, 0.975): -302.34kg/TJ, 1233.90kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 84.95kg/TJ, 1495.25kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

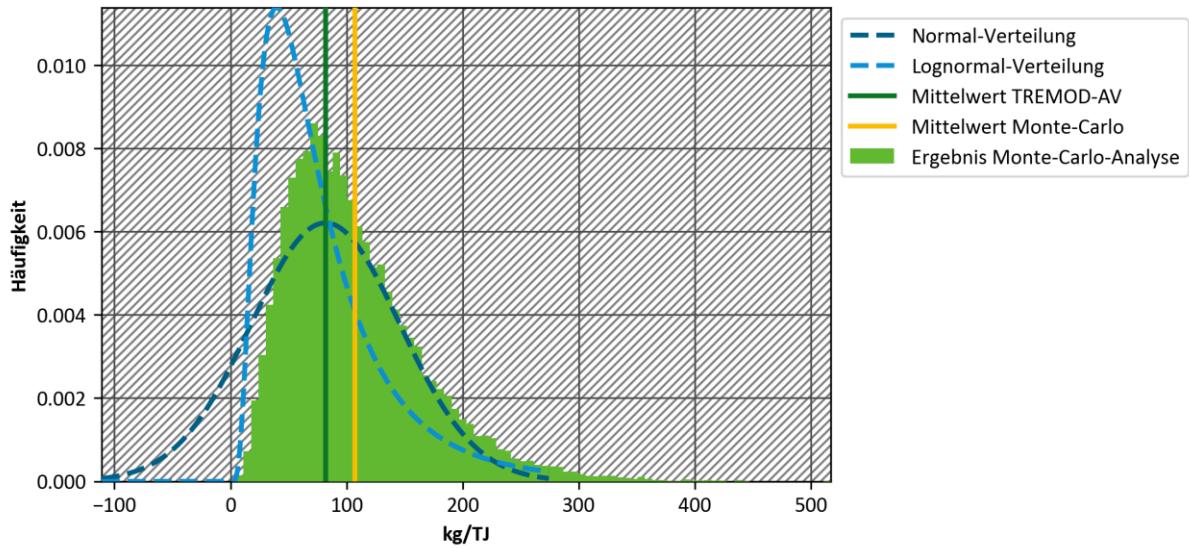


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 89: Verteilung NO_x – CCD international Flugbenzin

International, CCD, Flugbenzin (BF)

NO_x | Normal(0.025, 0.975): -44.20kg/TJ, 207.68kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 16.50kg/TJ, 250.26kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

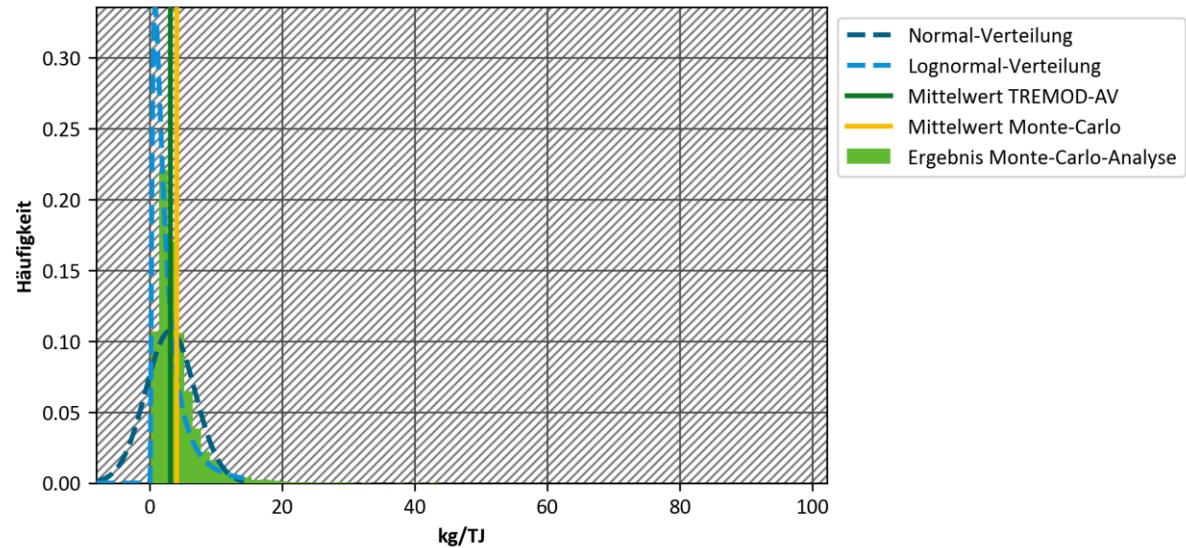


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 90: Verteilung PM – CCD international Flugbenzin

International, CCD, Flugbenzin (BF)

PM | Normal(0.025, 0.975): -4.21kg/TJ, 10.37kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 0.31kg/TJ, 12.60kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

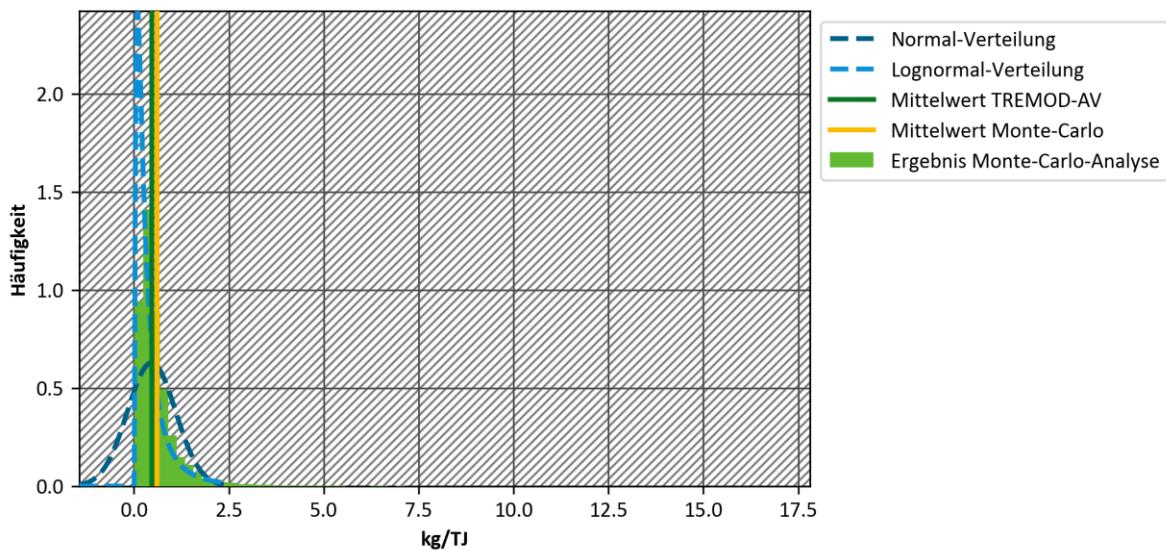


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 91: Verteilung BC – CCD international Flugbenzin

International, CCD, Flugbenzin (BF)

BC | Normal(0.025, 0.975): -0.78kg/TJ, 1.71kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 0.04kg/TJ, 2.05kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

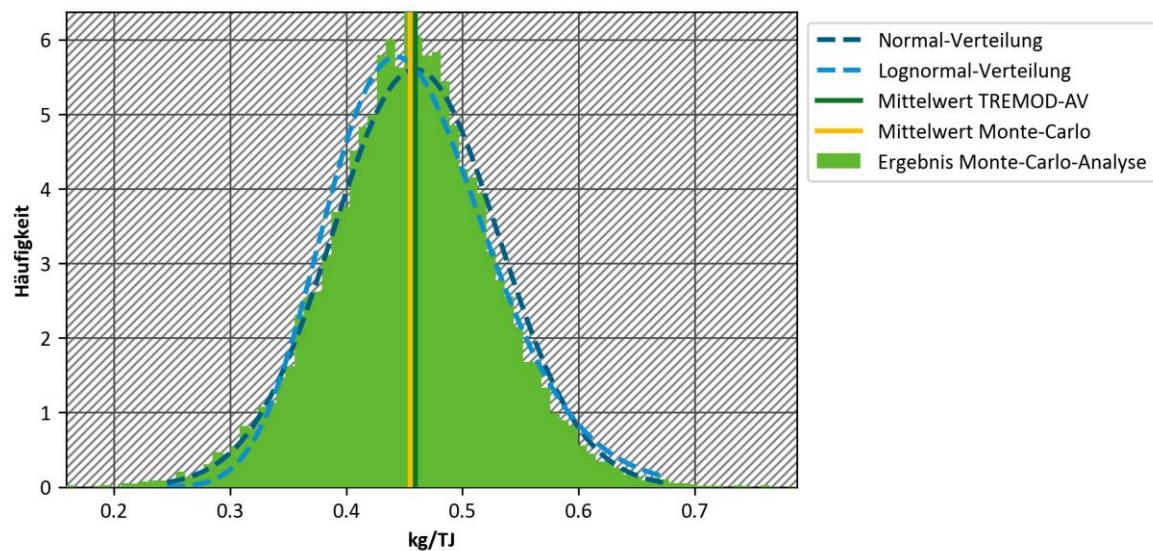


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 92: Verteilung SO₂ – CCD international Flugbenzin

International, CCD, Flugbenzin (BF)

SO₂ | Normal(0.025, 0.975): 0.32kg/TJ, 0.60kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 0.34kg/TJ, 0.61kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

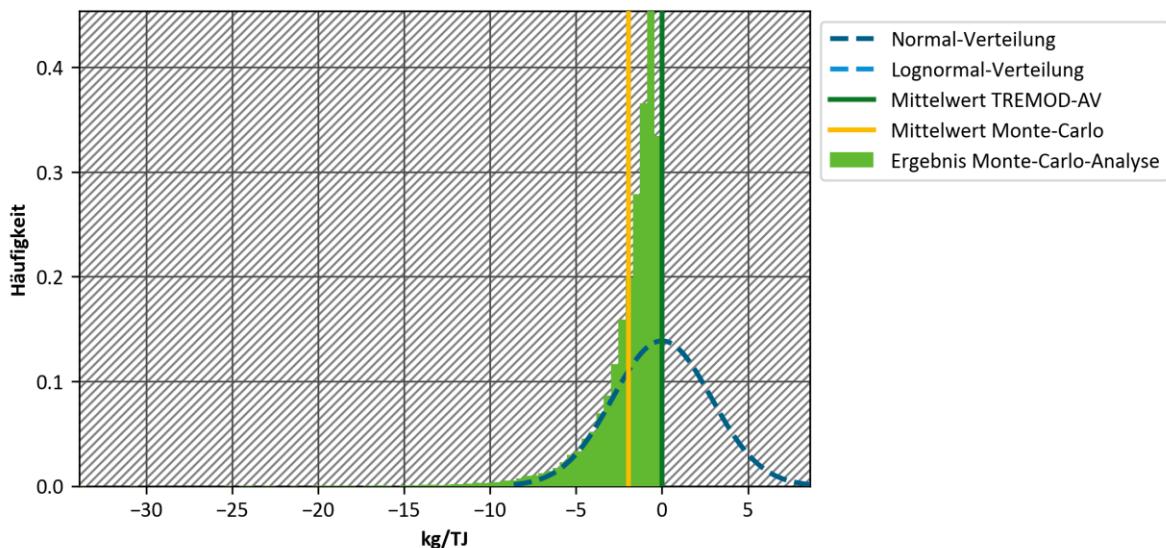


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 93: Verteilung CH₄ – CCD national Flugbenzin

National, CCD, Flugbenzin (BF)

CH₄ | Normal(0.025, 0.975): -5.64kg/TJ, 5.64kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): nankg/TJ, nankg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

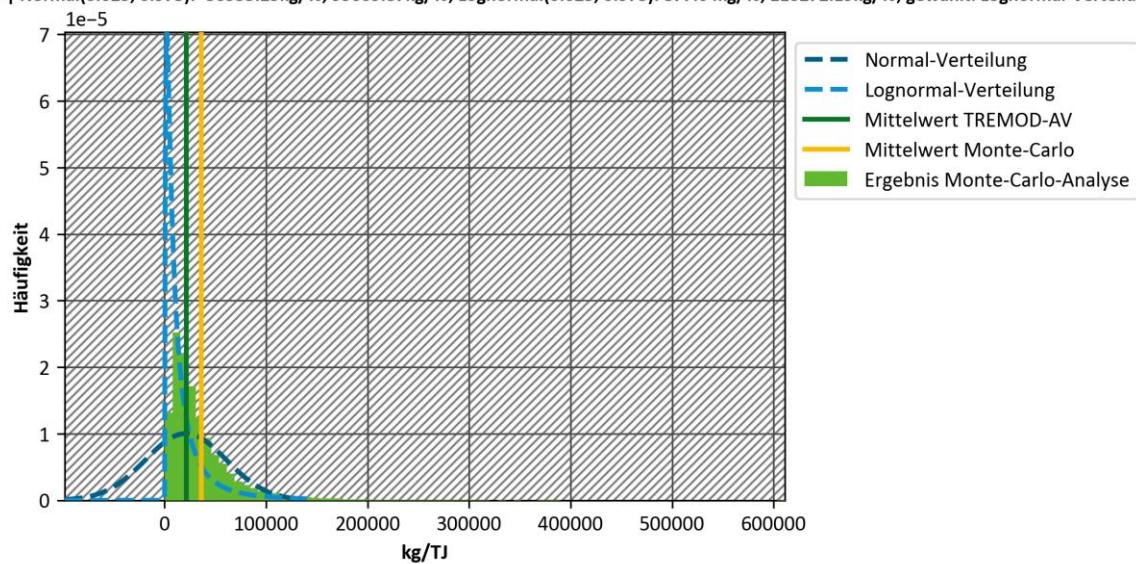


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 94: Verteilung CO – CCD national Flugbenzin

National, CCD, Flugbenzin (BF)

CO | Normal(0.025, 0.975): -56935.25kg/TJ, 99009.87kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 877.04kg/TJ, 110272.19kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

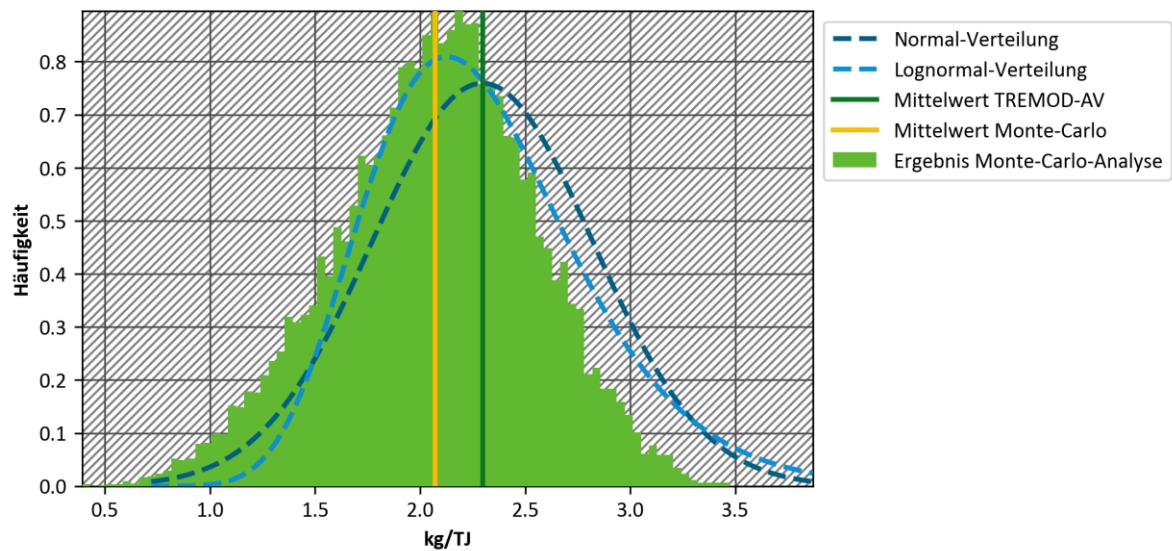


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 95: Verteilung N₂O – CCD national Flugbenzin

National, CCD, Flugbenzin (BF)

N₂O | Normal(0.025, 0.975): 1.27kg/TJ, 3.33kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 1.44kg/TJ, 3.49kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung

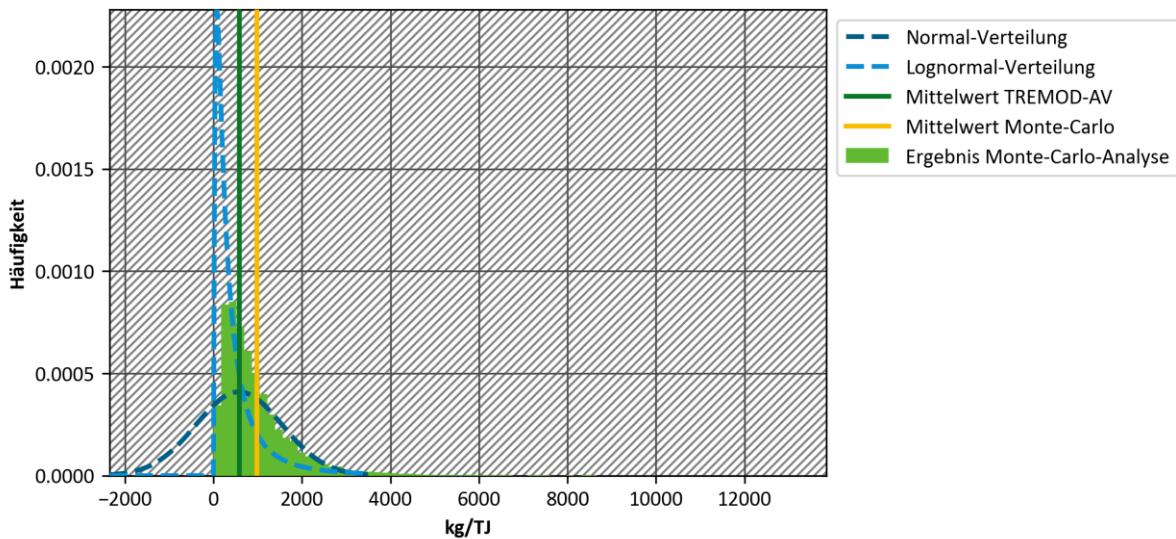


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 96: Verteilung NMVOC – CCD national Flugbenzin

National, CCD, Flugbenzin (BF)

NMVOC | Normal(0.025, 0.975): -1329.68kg/TJ, 2486.74kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 30.48kg/TJ, 2865.48kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

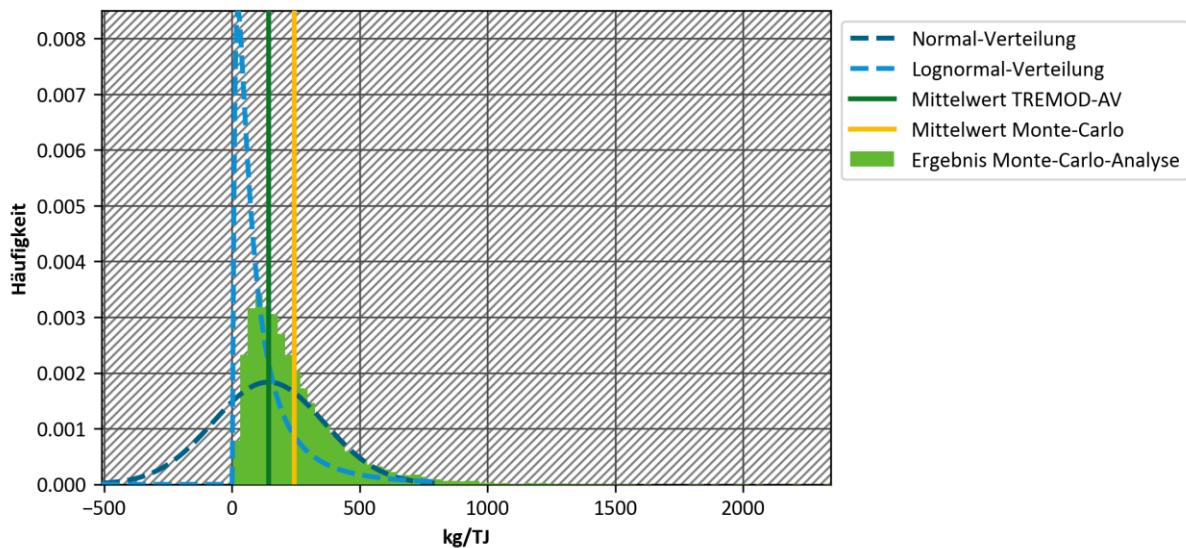


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 97: Verteilung NO_x – CCD national Flugbenzin

National, CCD, Flugbenzin (BF)

NO_x | Normal(0.025, 0.975): -283.84kg/TJ, 568.79kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 9.10kg/TJ, 670.13kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

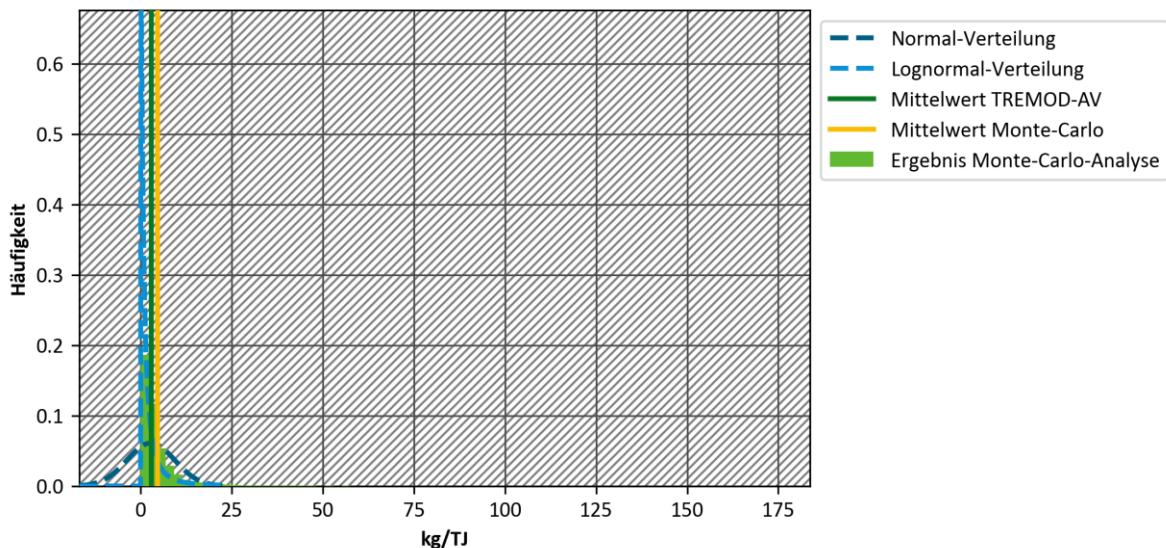


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 98: Verteilung PM – CCD national Flugbenzin

National, CCD, Flugbenzin (BF)

PM | Normal(0.025, 0.975): -10.02kg/TJ, 15.61kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 0.08kg/TJ, 16.00kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

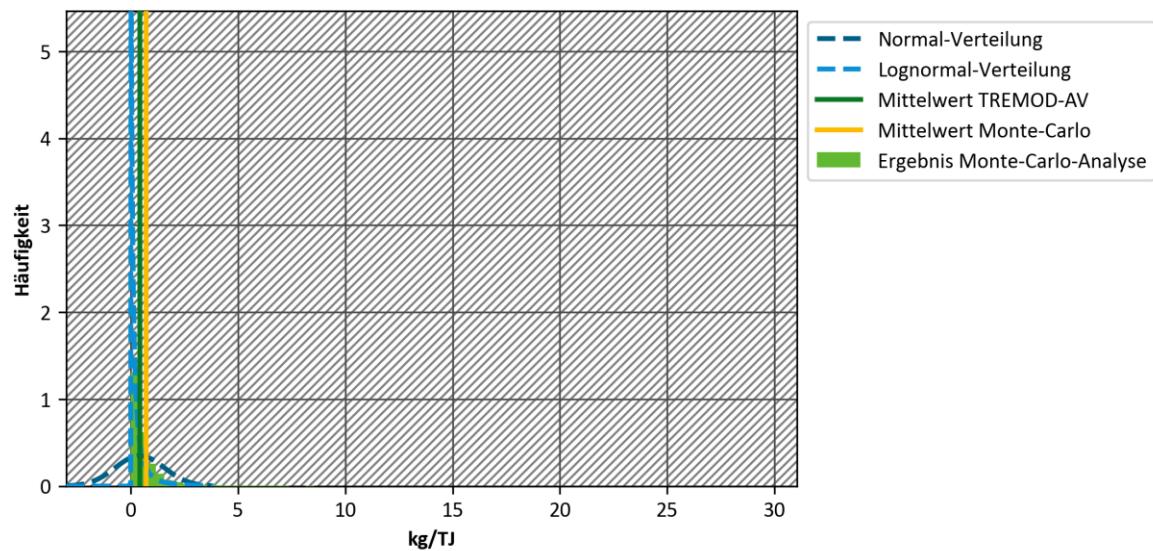


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 99: Verteilung BC – CCD national Flugbenzin

National, CCD, Flugbenzin (BF)

BC | Normal(0.025, 0.975): -1.82kg/TJ, 2.66kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 0.01kg/TJ, 2.52kg/TJ; gewählt: Lognormal-Verteilung

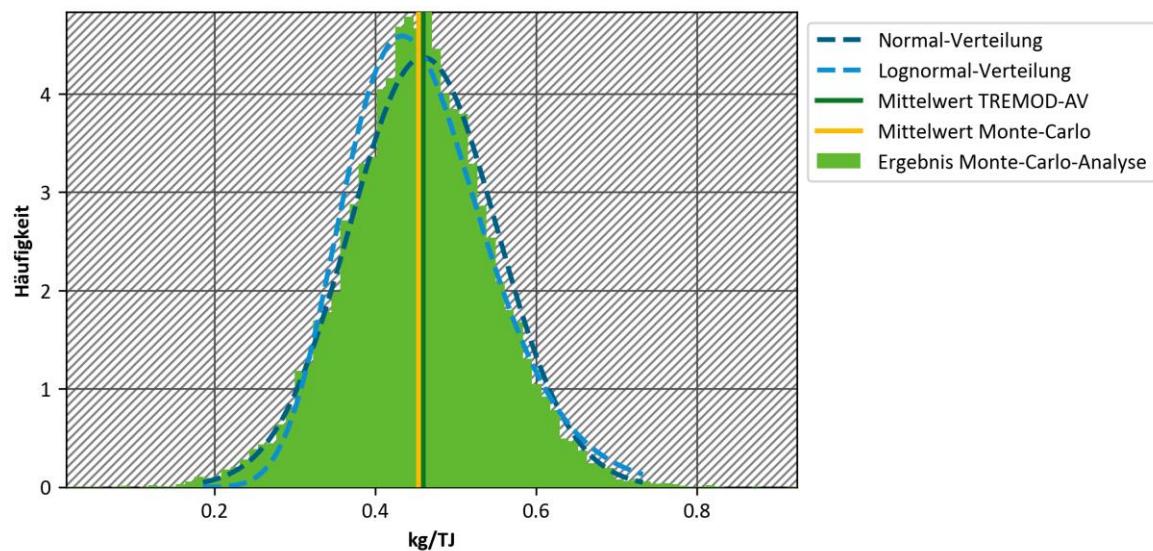


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 100: Verteilung SO₂ – CCD national Flugbenzin

National, CCD, Flugbenzin (BF)

SO₂ | Normal(0.025, 0.975): 0.28kg/TJ, 0.64kg/TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 0.31kg/TJ, 0.66kg/TJ; gewählt: Normal-Verteilung



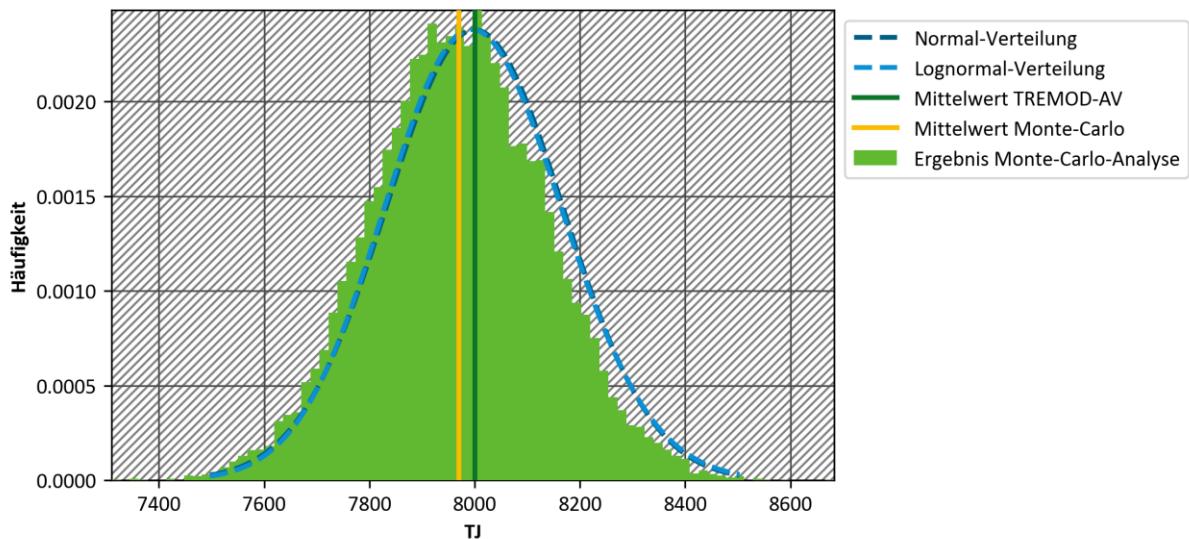
Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

B.3 Energiebilanzkorrektur

Abbildung 101: Verteilung Kerosinverbrauch nach Energiebilanzkorrektur – LTO national

LTO - National

Kerosin (K) | Normal(0.025, 0.975): 7670.97TJ, 8328.48TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 7675.98TJ, 8333.46TJ; gewählt: Normal-Verteilung

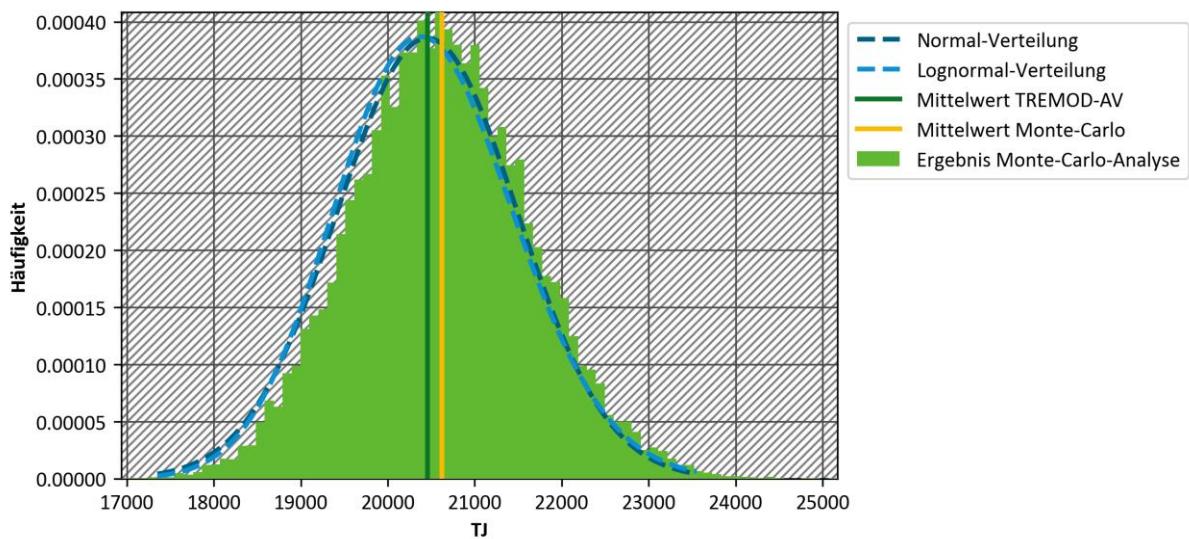


Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 102: Verteilung Kerosinverbrauch nach Energiebilanzkorrektur – CCD national

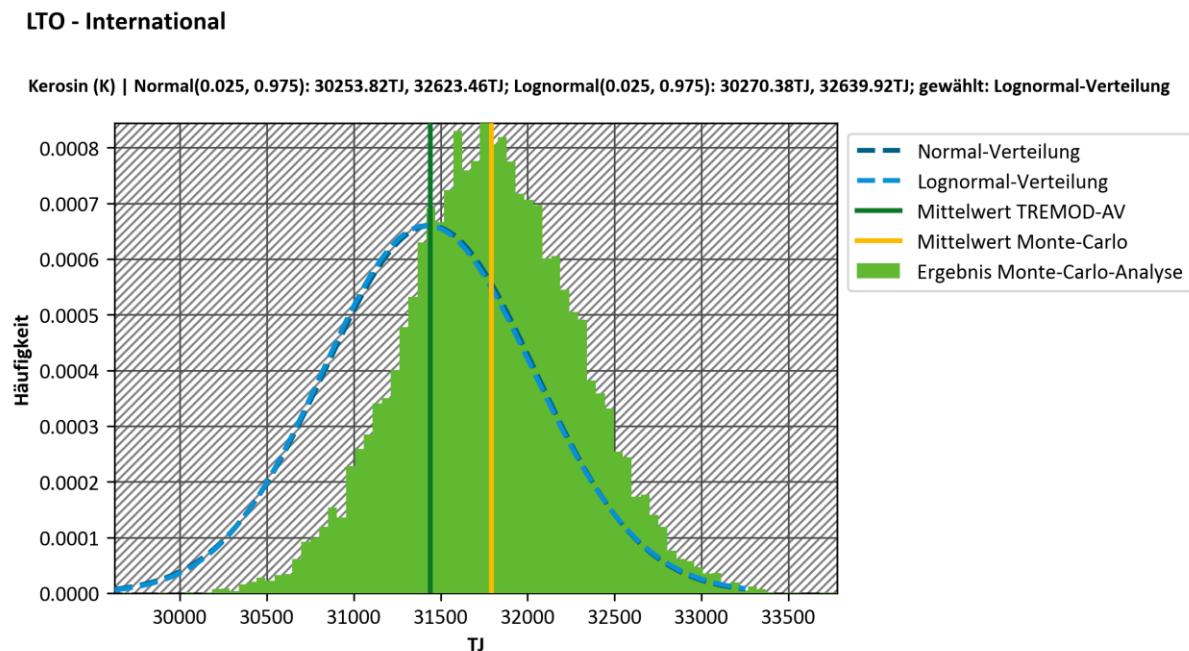
CCD - National

Kerosin (K) | Normal(0.025, 0.975): 18427.66TJ, 22482.59TJ; Lognormal(0.025, 0.975): 18502.43TJ, 22556.22TJ; gewählt: Normal-Verteilung



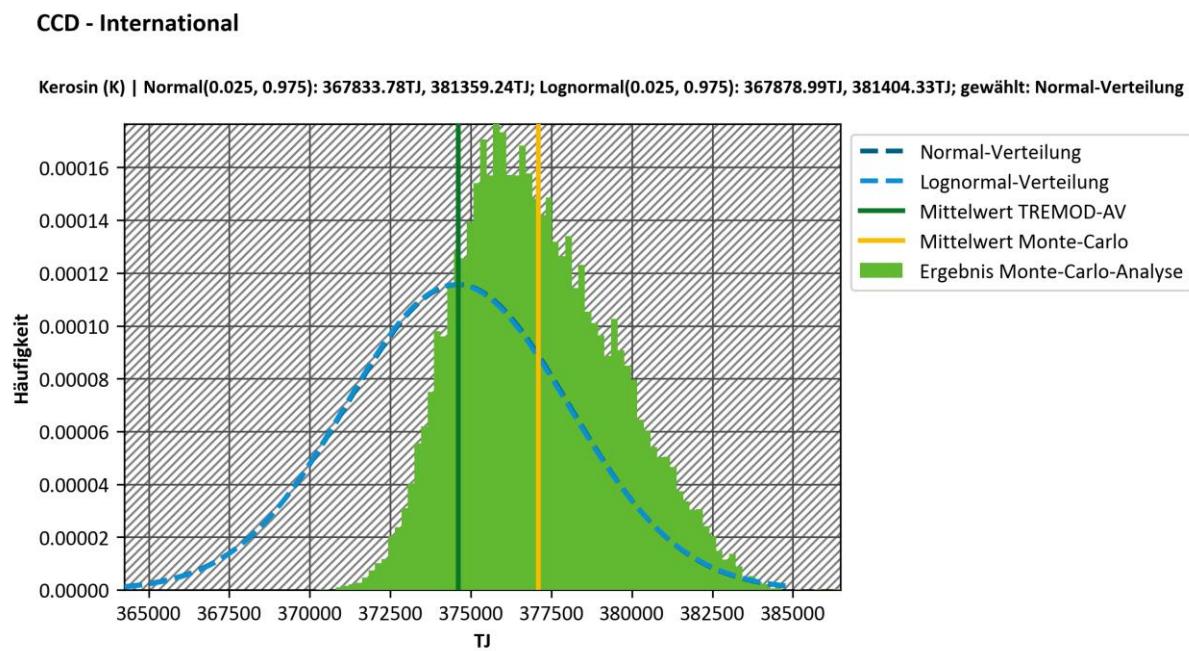
Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 103: Verteilung Kerosinverbrauch nach Energiebilanzkorrektur – LTO international



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.

Abbildung 104: Verteilung Kerosinverbrauch nach Energiebilanzkorrektur – CCD international



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu.