

TEXTE

116/2020

Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstatt ung 2020 (Berichtsperiode 1990- 2018)

Berichtsteil „TREMOD“

TEXTE 116/2020

Projektnummer 123 135

FB000365

Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018)

Berichtsteil „TREMOD“

von

Michel Allekotte, Kirsten Biemann, Christoph Heidt,
Marie Colson, Wolfram Knörr
ifeu-Institut, Heidelberg

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

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:

November 2019

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr
Gunnar Gohlisch

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2020

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

Kurzbeschreibung: Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018)

Das Emissionsberechnungsmodell „TREMOD“ (Transport Emission Model) bildet den motorisierten Verkehr in Deutschland hinsichtlich seiner Verkehrs- und Fahrleistungen, Energieverbräuche und den zugehörigen Luftschadstoffemissionen für den Zeitraum 1960 bis 2050 ab. Es wurde vom ifeu-Institut im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickelt und wird seit mehreren Jahren kontinuierlich fortgeschrieben.

Das aktuelle Vorhaben diente der Aktualisierung und Ergänzung von TREMOD. Für alle Verkehrsträger wurden die Bestands- und Fahr- und Verkehrsleistungsdaten bis zum Jahr 2018 fortgeschrieben. Anschließend wurde das Trendszenario bis zum Jahr 2050 aktualisiert.

Die aktuelle Fortschreibung der Basisdaten bis zum Jahr 2018 für die Emissionsberichterstattung im Nationalen Inventarbericht 2020 ist in der TREMOD-Version 6.01 vom 20.09.2019 enthalten. Die Aktualisierung des Trendszenarios wurde schließlich in der TREMOD-Version 6.03 vom 31.01.2020 realisiert.

Abstract: Update of the TREMOD/TREMOD-MM models for emissions reporting 2020 (reporting period 1990-2018)

The emission calculation model "TREMOD" (Transport Emission Model) depicts motorised traffic in Germany with regard to its traffic and driving performance, energy consumption and the associated air pollutant emissions for the period 1960 to 2050. It was developed by the ifeu Institute on behalf of the Federal Environment Agency and has been continuously updated for several years.

The current project served to update and supplement TREMOD. For all modes of transport, the inventory, driving and traffic performance data were updated until 2018. Subsequently, the trend scenario was updated until 2050.

The current update of the basic data up to 2018 for emissions reporting in the National Inventory Report 2020 is contained in TREMOD Version 6.01 of 20.09.2019. The update of the trend scenario was finally implemented in TREMOD version 6.03 of 31.01.2020.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	11
Abkürzungsverzeichnis.....	17
Zusammenfassung.....	19
Summary.....	24
1 Übersicht.....	29
2 Aktualisierung der Zeitreihe 1990-2018.....	30
2.1 Verkehrsträgerübergreifende Kennzahlen.....	30
2.1.1 Energetische Kennzahlen und Umrechnungsfaktoren.....	30
2.1.2 Kohlendioxidemissionen.....	31
2.1.3 Schwefeldioxid- und Bleiemissionen.....	32
2.1.4 Energieverbrauch nach Energiebilanz.....	33
2.1.5 Vergleich Kraftstoffabsatz mit dem Inlandsverbrauch.....	36
2.1.6 Verkehrsleistungen.....	40
2.2 Straßenverkehr.....	42
2.2.1 Fahrzeugbestand nach Antriebsart.....	42
2.2.2 Fahrleistungen nach Fahrzeugkategorien.....	47
2.2.3 Spezifischer Energieverbrauch und Emissionsfaktoren.....	48
2.2.3.1 Alternative Antriebsstränge.....	48
2.2.3.2 Aktualisierungen der warmen Emissionsfaktoren.....	49
2.2.3.3 Neue Verkehrssituationen und Fahrzyklen.....	50
2.2.3.4 Anpassung der Fahrverhaltensdaten.....	50
2.2.3.5 Aktualisierung der Kaltstart- und Verdampfungsemissionsfaktoren.....	51
2.2.3.6 Aktualisierung nicht geregelter Emissionsfaktoren.....	51
2.2.3.7 Vereinfachte Segmentierung.....	52
2.2.3.8 Software Updates der Diesel Pkw.....	52
2.2.3.9 Realer Kraftstoffverbrauch und CO ₂ -Emissionen.....	52
2.2.4 Vergleich der Ergebnisse 1990-2018.....	55
2.2.4.1 Fahrleistungen.....	55
2.2.4.2 Energieverbrauch.....	57
2.2.4.3 Stickstoffoxidemissionen.....	62
2.2.4.4 Abgas-Partikelemissionen.....	67
2.3 Schienenverkehr.....	71

2.3.1	Abgrenzung Schienenverkehr	71
2.3.2	Berechnungsmethodik	72
2.3.3	Verkehrs- und Betriebsleistungen	72
2.3.4	Energieverbrauch	74
2.3.5	Emissionsfaktoren	76
2.4	Binnenschifffahrt	77
2.4.1	Abgrenzung und Berechnungsmethodik Binnenschifffahrt	77
2.4.2	Verkehrsleistungen	77
2.4.3	Energieverbrauch	77
2.4.4	Emissionsfaktoren	78
2.5	Flugverkehr	79
2.5.1	Übersicht	79
2.5.2	Berechnungsmethodik	79
2.5.2.1	Bottom up Berechnung	79
2.5.2.2	Top-Down Abgleich für die Emissionsberichterstattung	81
2.5.3	Verkehrs- und Betriebsleistungen	82
2.5.4	Kraftstoffverbrauch	83
2.5.5	Schadstoffe	87
3	Aktualisierung des Trendszenarios bis 2050	92
3.1	Definition des Trendszenarios	92
3.2	Sozio-ökonomische Annahmen	92
3.3	Entwicklung der Verkehrs-, Fahr- und Betriebsleistungen	93
3.3.1	Annahmen zur Verkehrsleistungsentwicklung	93
3.3.1.1	Personenverkehr	93
3.3.1.2	Güterverkehr	94
3.3.2	Annahmen zur Fahrleistungsentwicklung im Straßenverkehr	95
3.3.3	Betriebsleistung und Auslastung im Schienenverkehr	96
3.3.4	Schiffskilometer und Auslastung der Binnenschifffahrt	96
3.4	Entwicklung der Fahrzeugflotten im Straßenverkehr	97
3.4.1	Personenkraftwagen	97
3.4.1.1	Pkw-Neuzulassungszahl und -anteile	97
3.4.1.2	Pkw-Überlebenswahrscheinlichkeiten und -bestand	98
3.4.2	Leichte Nutzfahrzeuge	102
3.4.3	Schwere Nutzfahrzeuge	103

3.4.4	Busse	106
3.4.5	Motorisierte Zweiräder	109
3.5	Entwicklung der Energieeffizienz	110
3.5.1	Pkw und leichte Nutzfahrzeuge	111
3.5.2	SNF, Busse und motorisierte Zweiräder	114
3.5.3	Schienenverkehr	115
3.5.4	Binnenschifffahrt	116
3.5.5	Flugverkehr	116
3.6	Entwicklung der spezifischen Emissionen.....	117
3.6.1	Abgasgesetzgebung Straßenverkehr	117
3.6.1.1	Einführungszeiträume bei Pkw	117
3.6.1.2	Einführungszeiträume bei leichten Nutzfahrzeugen	118
3.6.1.3	Einführungszeiträume bei schweren Nutzfahrzeugen	119
3.6.1.4	Einführungszeiträume bei Bussen	119
3.6.1.5	Einführungszeiträume motorisierten Zweirädern	120
3.6.2	Schienenverkehr	120
3.6.3	Binnenschifffahrt	121
3.6.4	Flugverkehr	121
3.7	Entwicklung der Vorketten und der Anteile der Energieträger	122
3.7.1	Fossile flüssige und gasförmige Kraftstoffe	122
3.7.2	Biokraftstoffe	122
3.7.2.1	Anteile der Biokraftstoffe am Endenergieverbrauch.....	123
3.7.2.2	Biomassemix und Emissionsfaktoren	126
3.7.3	Strom.....	126
3.7.3.1	Emissionsmodellierung in TREMOD und HBEFA.....	126
3.7.3.2	Emissionsfaktoren der Stromerzeugung.....	127
3.7.3.3	Entwicklung des Strommixes	129
3.7.3.4	Ergebnisse.....	130
3.7.3.5	Vorgehen im TREMOD Trendszenario	131
4	Energieverbrauch und Emissionen des Verkehrs	132
4.1	Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs nach Energieträgern.....	132
4.2	Endenergieverbrauch aller Verkehrsträger	133
4.3	Direkte Abgasemissionen des Straßenverkehrs.....	134
4.4	Treibhausgasemissionen des Verkehrs nach Territorialprinzip	136

4.5	Treibhausgasemissionen des Verkehrs im nationalen Inventarbericht (NIR).....	138
5	Quellenverzeichnis	140
A	Aktualisierung und Erweiterung des Busverkehrs	146
A.1	Übersicht	146
A.2	Bestand je Buskategorie.....	146
A.3	Fahrleistung je Buskategorie.....	147
A.4	Beförderungsangebot und Beförderungsleistung je Buskategorie	149
B	Aktualisierung der Fahrleistungen im Straßenverkehr	151
B.1	Verwendung von Fahrleistungsdaten in TREMOD.....	151
B.1.1	Struktur und Definitionen	151
B.1.2	Datenquellen.....	154
B.2	Aufbereitung der Fahrleistungserhebung 2014 für TREMOD.....	163
B.2.1	Übersicht: Inlands- und Inländerfahrleistung 2014	164
B.2.2	Ableitung der Inlandsfahrleistung 2014 nach Straßentypen in TREMOD.....	167
B.2.3	Fahrleistung nach Fahrzeugalter.....	175
B.2.4	Fahrleistung nach Antriebsart und Größenklasse	178
B.2.5	Aktualisierung der Fahrleistungszeitreihe in TREMOD.....	181
C	Aktualisierung der Kraftstoffverbräuche in HBEFA und TREMOD	189
C.1	Aufgabenstellung	189
C.2	Eingangsdaten	189
C.3	Methodik.....	190
C.3.1	Kalibration der Kraftstoffeffizienz in HBEFA	190
C.3.2	Neuer Preprocessor für Fahrzeugkategorien mit CO ₂ -Monitoring.....	190
C.4	Ergebnisse	191
D	Aktualisierung der Methodik und Datengrundlage Flugverkehr.....	192
D.1	Anpassung von Flugzeugkenngrößen	192
D.2	Anpassung von Emissionsfaktoren und Verbräuche im Flugverkehr	192
D.3	Überarbeitung der LTO-Emissionen und -Verbräuche.....	196
D.4	Überarbeitung des Flugverkehrs auf sonstigen Flugplätzen und des nicht gewerblichen Flugverkehrs.....	197
E	Aktualisierung der Methodik für die Binnenschifffahrt	200
E.1	Spezifischer Energiebedarf.....	200
E.2	Spezifische Emissionsfaktoren	203
E.3	Auswirkungen der Aktualisierungen auf das Gesamtergebnis	204

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vergleich des in TREMOD ermittelten Kraftstoffverbrauchs im Flugverkehr mit den Angaben von Fluggesellschaften für das Jahr 2018	80
Abbildung 2:	Vergleich der Anteile des Kerosinverbrauchs des nationalen Flugverkehrs am Gesamtkerosinverbrauch nach TREMOD und Eurocontrol	82
Abbildung 3:	Entwicklung der Starts, Flugzeugkilometer und Verkehrsleistungen des Flugverkehrs in Deutschland 1990-2018	83
Abbildung 4:	Jährlicher Energiebedarf (Flugbenzin und Kerosin) des Flugverkehrs in Deutschland nach TREMOD, Eurocontrol und Energiebilanz	84
Abbildung 5:	Verbräuche von Kerosin und Flugbenzin – Abgleich der Werte von TREMOD vor und nach der Aktualisierung und der Energiebilanz	85
Abbildung 6:	Kraftstoffverbrauch für den nationalen, internationalen und gesamten Flugverkehr	85
Abbildung 7:	Anteil der LTO-Phase am Kraftstoffverbrauch	86
Abbildung 8:	Kraftstoffverbrauch pro Personenkilometer im nationalen und internationalen Flugverkehr	87
Abbildung 9:	NO _x -, CO-, HC- und PM-Emissionen des nationalen Flugverkehrs auf den ausgewählten Flughäfen 1990-2018	88
Abbildung 10:	SO ₂ -Emissionen des gesamten Flugverkehrs in Deutschland	89
Abbildung 11:	NO _x -Emission des gewerblichen Flugverkehrs in der LTO-Phase im Jahr 2018 differenziert nach Flughäfen [t/a]	90
Abbildung 12:	Anteil des internationalen Verkehrs an den NO _x -Emissionen des gesamten gewerblichen Verkehrs in der LTO-Phase	91
Abbildung 13:	Energieverbrauch des Straßenverkehrs in Deutschland nach Energieträgern - Entwicklung des Endenergieverbrauchs bis 2018 und im Trendszenario bis 2050	133
Abbildung 14:	Energieverbrauch des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung des Endenergieverbrauchs bis 2018 und im Trendszenario bis 2050	134
Abbildung 15:	Stickstoffoxidemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen bis 2018 und im Trendszenario bis 2050	135
Abbildung 16:	Abgaspartikelemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen bis 2018 und im Trendszenario bis 2050	136
Abbildung 17:	Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung der Gesamtemissionen bis 2018 und im Trendszenario bis 2050	137

Abbildung 18:	Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung bis 2018 in der Abgrenzung der Emissionsberichterstattung	139
Abbildung 19:	Kraftstoffverbrauch in der CCD-Phase pro Turbine vom A320 neo und von drei definierten Flugzeugtypen	194
Abbildung 20:	Verbrauchsverbesserung von drei Turbinentypen (Einsatz im A330)	196
Abbildung 21:	Spezifischer Energiebedarf von Frachtschiffen auf freifließenden Gewässern zu Berg.....	201
Abbildung 22:	Spezifischer Energiebedarf von Frachtschiffen auf freifließenden Gewässern zu Tal	202

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Energiekennzahlen für Kraftstoffe	30
Tabelle 2:	Kennzahlen der Zertifizierungskraftstoffe im HBEFA	30
Tabelle 3:	CO ₂ -Emissionsfaktoren für Kraftstoffe und Gase (in kg/TJ).....	31
Tabelle 4:	Blei- und SO ₂ -Emissionsfaktoren für Kraftstoffe und Gase im Verkehr (in kg/TJ)	32
Tabelle 5:	Kraftstoffabsatz in Deutschland nach Energiebilanz 1990-2018.....	34
Tabelle 6:	Vergleich Verbrauch im Inland und Absatz für Benzin und Diesel im Straßenverkehr 1990-2018.....	36
Tabelle 7:	Anpassungsfaktoren Kraftstoffabsatz Energiebilanz / Inlandsverbrauch TREMOD 1990-2018	38
Tabelle 8:	Verkehrsleistungsentwicklung 2010-2018	41
Tabelle 9:	Berücksichtigte Antriebsarten pro Fahrzeugkategorie bis zum Bezugsjahr 2018	42
Tabelle 10:	Entwicklung des Pkw-Bestands nach Antriebsart 2000-2018	43
Tabelle 11:	Entwicklung des LNF-Bestands von 2000-2018 nach Antriebsart.....	43
Tabelle 12:	Entwicklung des SNF-Bestands nach Antrieben 2000-2018.....	44
Tabelle 13:	Entwicklung des Reise- und Linienbus-Bestands von 2000-2018 nach Antriebsart.....	45
Tabelle 14:	Entwicklung des KR-, KKR- und Pedelec-Bestands nach Antrieben 2000-2018.....	46
Tabelle 15:	Aktualisierte Fahrleistungsdaten in TREMOD für Deutschland 2014.....	47
Tabelle 16:	Fahrleistungsentwicklung in Deutschland nach Fahrzeugkategorien 1990-2018.....	47
Tabelle 17:	Anteil der Fahrleistungen nach Höchstgeschwindigkeitsklassen in Deutschland im HBEFA 4.1 und in TREMOD 6.....	50
Tabelle 18:	Anteil der Fahrleistungen nach Level of Service in Deutschland im HBEFA 4.1 und in TREMOD 6.....	51

Tabelle 19:	CO ₂ -Emissionen aus der Typzulassung und abgeleitete reale CO ₂ -Emissionen der Pkw-Zulassungen in Deutschland 1995 bis 2018.....	53
Tabelle 20:	CO ₂ -Emissionen von NEFZ, Spritmonitor.de und HBEFA für die EURO-Klassen 3 bis 6a,b vom Diesel-Durchschnitts-Pkw.....	54
Tabelle 21:	CO ₂ -Emissionen von NEFZ, Spritmonitor.de und HBEFA für die EURO-Klassen 3 bis 6a,b vom Otto-Durchschnitts-Pkw.....	54
Tabelle 22:	CO ₂ -Emissionen von NEFZ, Spritmonitor.de und HBEFA die EURO-Klassen 3 bis 6a,b von leichten Nutzfahrzeugen I-III Diesel-Durchschnitt.....	55
Tabelle 23:	CO ₂ -Emissionen von NEFZ, Spritmonitor.de und HBEFA für die EURO-Klassen 3 bis 6a,b von leichten Nutzfahrzeugen I-III Otto-Durchschnitt.....	55
Tabelle 24:	Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 – Fahrleistungen.....	56
Tabelle 25:	Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 – spezifischer Energieverbrauch.....	57
Tabelle 26:	TREMOD-Version 6.0 – gesamter Energieverbrauch Inland.....	58
Tabelle 27:	Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 – Energieverbrauch Inland.....	59
Tabelle 28:	TREMOD-Version 6.0 – gesamter Energieverbrauch nach Energiebilanz.....	60
Tabelle 29:	Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 – gesamter Energieverbrauch nach Energiebilanz.....	61
Tabelle 30:	TREMOD-Version 6.0 – NO _x -Emissionsfaktoren (in g/km).....	63
Tabelle 31:	Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 – spezifische NO _x -Emissionsfaktoren (Bezug g/km).....	64
Tabelle 32:	TREMOD-Version 6.0 – NO _x -Emissionen nach Energiebilanz.....	65
Tabelle 33:	Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 – NO _x -Emissionen nach Energiebilanz.....	66
Tabelle 34:	TREMOD-Version 6.0 – Abgas-Partikel-Emissionsfaktoren (in g/km).....	67
Tabelle 35:	Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 – spezifische Abgas-Partikel-Emissionsfaktoren (Bezug g/km).....	68
Tabelle 36:	TREMOD-Version 6.0 –Abgas-Partikel-Emissionen nach Energiebilanz.....	69
Tabelle 37:	Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 – Abgas-Partikel-Emissionen nach Energiebilanz.....	70
Tabelle 38:	Verkehrsleistungsentwicklung des Personenverkehrs der Eisenbahnen in Deutschland 1994-2018.....	72
Tabelle 39:	Verkehrsleistungsentwicklung des Güterverkehrs der Eisenbahnen in Deutschland 1994-2018.....	73

Tabelle 40:	Berechneter Dieserverbrauch der Eisenbahnen in Deutschland im Vergleich mit der Energiebilanz 1994-2018	75
Tabelle 41:	Emissionsfaktoren des dieselbetriebenen Schienenverkehrs (in g/kg) für ausgewählte Jahre	76
Tabelle 42:	Verkehrsleistung und Energieverbrauch der Binnenschifffahrt 1994-2018.....	77
Tabelle 43:	Mittlere Emissionsfaktoren der Binnenschifffahrt (in g/kg) für ausgewählte Jahre	78
Tabelle 44:	Sozio-ökonomische Randbedingungen der „Verkehrsprognose 2030“ und aktuelle Annahmen für das TREMOD- Trendszenario	93
Tabelle 45:	Entwicklung der Personenverkehrsleistung 2010-2050 (bisherige Annahmen in Klammern).....	94
Tabelle 46:	Entwicklung der Transportleistung 2010-2050 (bisherige Annahmen in Klammern, sofern abweichend).....	95
Tabelle 47:	Entwicklung der Auslastungsgrade im Güter-, Personenfern- und Personennahverkehr der DB	96
Tabelle 48:	Entwicklung des Dieselanteils an den Betriebsleistungen im Güter-, Personenfern- und Personennahverkehr der DB.....	96
Tabelle 49:	Anteil der Neuzulassungen der PKW im Trendszenario nach Antriebsart.....	98
Tabelle 50:	Überlebenswahrscheinlichkeiten der Pkw nach Antriebsart im Trend-Szenario	99
Tabelle 51:	Entwicklung der Pkw-Bestände nach Antriebsart 1990-2018 und im Trend-Szenario 2019-2050 (in Mio. Kfz).....	100
Tabelle 52:	Anteil der Neuzulassungen der LNF im Trendszenario nach Antriebsart.....	103
Tabelle 53:	Anzahl jährlicher Neuzulassungen der SNF im Trendszenario (in 1000 Fahrzeugen)	103
Tabelle 54:	Anteil der Neuzulassungen der SNF im Trendszenario nach Antriebsart.....	104
Tabelle 55:	Überlebenswahrscheinlichkeiten der LNF und SNF nach Größenklasse im Trend-Szenario.....	105
Tabelle 56:	Anzahl jährlicher Neuzulassungen der Busse im Trendszenario	106
Tabelle 57:	Anteil der Neuzulassungen der Linien- und Reisebusse im Trendszenario nach Antriebsart	108
Tabelle 58:	Überlebenswahrscheinlichkeiten der Busse nach Bustyp und Größenklasse im Trend-Szenario.....	108
Tabelle 59:	Anzahl jährlicher Neuzulassungen motorisierter Zweiräder im Trendszenario (in Tausend Fahrzeugen)	109
Tabelle 60:	Anteil der Neuzulassungen motorisierter Zweiräder im Trendszenario nach Antriebsart	110

Tabelle 61:	Jährliche Verbrauchsminderung in den Fahrzyklen von Pkw und LNF mit Verbrennungsmotor (Otto, Diesel, LPG, CNG und PHEV)	111
Tabelle 62:	Typprüfwerte und Zuschläge für den Realverbrauch von Pkw gegenüber den Typprüfwerten NEFZ (bis 2020) und WLTP (ab 2021).....	112
Tabelle 63:	Typprüfwerte und Zuschläge für den Realverbrauch von LNF gegenüber den Typprüfwerten NEFZ (bis 2020) und WLTP (ab 2021).....	113
Tabelle 64:	Jährliche Reduktion des spezifischen Kraftstoffverbrauchs bei SNF- und Bussen (Diesel, CNG, LNG sowie HEV) im Trendszenario	115
Tabelle 65:	RDE-Abgasgesetzgebung für PKW	117
Tabelle 66:	Anteile Eurostufen an den Neuzulassungen bei Pkw	117
Tabelle 67:	Anteile Eurostufen an den Neuzulassungen bei den leichten Nutzfahrzeugen	118
Tabelle 68:	Anteile Eurostufen an den Neuzulassungen bei den schweren Nutzfahrzeugen	119
Tabelle 69:	Anteile Eurostufen an den Neuzulassungen bei Bussen	119
Tabelle 70:	Emissionsgrenzwerte Schienenverkehr (g/kWh)	120
Tabelle 71:	Mittlere Emissionsfaktoren der Binnenschifffahrt (in g/kg) im Trendszenario	121
Tabelle 72:	THG-Emissionen der Vorkette fossiler Kraftstoffe im Trendszenario (g CO ₂ eq/MJ).....	122
Tabelle 73:	Anteile Biokraftstoffe und Strom im Trendszenario	123
Tabelle 74:	Beispielrechnungen Erfüllung der THG-Quote 2020 im Trendszenario	124
Tabelle 75:	Anteil erneuerbarer Energien im Verkehr im Jahr 2030 und Anrechnung nach RED II	125
Tabelle 76:	Biomasse (Anteile) der Biokraftstoffe im Trendszenario.....	126
Tabelle 77:	THG-Emissionsfaktoren (g CO ₂ eq/MJ) der Biokraftstoffe im Trendszenario	126
Tabelle 78:	Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung	128
Tabelle 79:	European Reference Scenario Strommix EU 28	129
Tabelle 80:	European Reference Scenario Strommix Deutschland.....	129
Tabelle 81:	Langfristszenarien Basisszenario	130
Tabelle 82:	Gegenüberstellung der berechneten Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung in g CO ₂ eq/ kWh in verschiedenen Szenarien und der UBA-Realwerte	130
Tabelle 83:	Bestand der Busse zur Jahresmitte 2018 in TREMOD nach ausgewählten Merkmalen.....	147
Tabelle 84:	Bestand der Busse 2012 bis 2018 in TREMOD nach Buskategorien.....	147

Tabelle 85:	Statistisch erfasste Inlandsfahrleistungen der Busse nach Verkehrsart.....	147
Tabelle 86:	Mittlere Jahresfahrleistung der Busse.....	148
Tabelle 87:	Hochgerechnete Inlandsfahrleistungen der Busse nach Fahrzeugart.....	148
Tabelle 88:	Statistisch erfasste Betriebs- und Beförderungsleistung der Busse (Inlandsverkehr) 2012 bis 2017.....	149
Tabelle 89:	Verkehrsleistungen der Busse (Inlandsverkehr) in TREMOD 2012 bis 2018	150
Tabelle 90:	Straßenkategorien und Straßentypen in TREMOD.....	151
Tabelle 91:	Definition und Zuordnung der Fahrzeugkategorien.....	152
Tabelle 92:	Fahrleistungen in Deutschland 1993 differenziert nach Fahrzeugkategorien (in Mio. km)	154
Tabelle 93:	Fahrleistungen auf den freien Strecken der Autobahnen, Bundes- und Landesstraßen in Deutschland sowie den Kreisstraßen in den alten Bundesländern 1995	155
Tabelle 94:	Fahrleistungen auf den freien Strecken der Autobahnen, Bundes- und Landesstraßen in Deutschland 2000	156
Tabelle 95:	Fahrleistungen auf den freien Strecken der Autobahnen, Bundes- und Landesstraßen in Deutschland 2005	156
Tabelle 96:	Fahrleistungen auf den freien Strecken der Autobahnen und Bundesstraßen in Deutschland 2010.....	157
Tabelle 97:	Fahrleistungen auf den freien Strecken der Autobahnen und Bundesstraßen in Deutschland 2015.....	157
Tabelle 98:	Fahrleistungsentwicklung auf Autobahnen und Bundesstraßen an den automatischen Dauerzählstellen 1993 bis 2015	158
Tabelle 99:	Inländerfahrleistung 1993 und 2002	159
Tabelle 100:	Inlandsfahrleistung 1993 und 2002 nach Fahrzeugarten.....	159
Tabelle 101:	Inländer- und Inlandsfahrleistung nach Fahrzeugarten 2002	160
Tabelle 102:	Mittlere Jahresfahrleistung der Fahrzeuge in Deutschland 2013 bis 2017 nach KBA-Daten (Stand November 2018).....	161
Tabelle 103:	Fahrleistungsentwicklung der mautpflichtigen Fahrzeuge	162
Tabelle 104:	Ergebnisse der Inlandsfahrleistung 2014 in Mrd Fzg-km	165
Tabelle 105:	Ergebnisse der Inländerfahrleistung 2014 in Mrd Fz-km	166
Tabelle 106:	Relativer Standardfehler für Inlands- und Inländerfahrleistung	167
Tabelle 107:	Abgeleitete Fahrleistung für TREMOD	168
Tabelle 108:	Abgeleitete Fahrleistung nach Straßentypen für TREMOD in 2014.....	169
Tabelle 109:	Vergleich der Krafträder-Fahrleistung nach Datenquellen	169
Tabelle 110:	Fahrleistung der Krafträder nach Straßentyp in 2014.....	170
Tabelle 111:	Vergleich der Pkw Fahrleistung nach Datenquellen.....	170
Tabelle 112:	Pkw Fahrleistung nach Straßentyp in 2014	171
Tabelle 113:	Vergleich der Busfahrleistung nach Datenquellen	171

Tabelle 114:	Fahrleistung der Busse nach Straßentyp (2014).....	172
Tabelle 115:	Anteil der angegebenen Fahrzeugkategorien an der Güterverkehrsfahrleistung	172
Tabelle 116:	Vergleich der LNF Fahrleistung nach Datenquellen	173
Tabelle 117:	Inlandsfahrleistung deutscher LNF	173
Tabelle 118:	Fahrleistung der LNF nach Straßentyp (2014).....	173
Tabelle 119:	Fahrleistung der Lkw nach Datenquellen	174
Tabelle 120:	Inlandsfahrleistung deutscher Lkw.....	174
Tabelle 121:	Fahrleistung der SZ nach Datenquellen.....	174
Tabelle 122:	Inlandsfahrleistung deutscher SZ	174
Tabelle 123:	Fahrleistung des Schwerverkehrs nach Straßentyp (Interpolation 2014)	175
Tabelle 124:	Jährliche mittlere Fahrleistung der Fahrzeugkategorien nach Fahrzeugalter in Relation zu Neufahrzeugen (Alter = 0)	177
Tabelle 125:	Zuordnung und mittlere FL für die Krafträder nach Größenklasse in TREMOD und in der HB.....	178
Tabelle 126:	Gewichtung der mittleren FL der Pkw nach Antriebsart.....	179
Tabelle 127:	Gewichtung der FL nach Größenklasse laut TREMOD und HB für Busse.....	179
Tabelle 128:	Gewichtung der FL nach Größenklasse laut TREMOD und HB für LNF	180
Tabelle 129:	Gewichtung der FL nach Größenklasse und Antriebsart für die Lkw ohne Anhänger	180
Tabelle 130:	Gewichtung der mittleren FL nach Größenklasse der Lkw mit Anhänger und Sattelzüge	180
Tabelle 131:	Fahrleistung der Fahrzeugkategorien im Straßenverkehr nach Straßentypen in Deutschland 1990 bis 2018.....	182
Tabelle 132:	Spezifischer Kraftstoffverbrauch in kg/s pro Turbine.....	194
Tabelle 133:	Anzahl Starts, durchschnittliche Flugdistanzen und Passagierzahlen pro Start für Flugzeugtypen der Größenklasse 2-5,7t auf den ausgewählten Flughäfen im Jahr 2018	198
Tabelle 134:	Anzahl Starts, gesamte Flugzeugkilometer und Verkehrsleistung (PV) für Flugzeugtypen der Größenklasse 2- 5,7t auf den sonstigen Flughäfen im Jahr 2018.....	199
Tabelle 135:	Vergleich des spezifischen Dieserverbrauchs für Güterschiffe auf dem Rhein im Jahr 2017 im Projekt Prominent und TREMOD-NA	200
Tabelle 136:	Emissionsfaktoren für Binnenschiffsmotoren bei 35% der maximalen Motorlast	203
Tabelle 137:	Gesamtergebnisse für die Binnenschifffahrt von 2000 bis 2050 und Darstellung der Änderungen	204

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
BADA	Base of Aircraft Data (Datenbasis für Luftfahrzeuge)
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
bbf	Volumeneinheit verwendet für Erdölprodukte (entspricht 159 Liter)
BEV	Battery-electric vehicle
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CCD	Reiseflug oberhalb 3.000 Fuß (Climb Cruise Descent)
CD	Charge Depleting : reiner Elektrobetrieb beim PHEV = Verbrauch von extern geladenen Strom
CH4	Methan
CNG	Compressed Natural Gas (deutsch: „komprimiertes Erdgas“)
CO	Kohlenmonoxid
CO₂	Kohlendioxid
CS	Charge Sustaining: reiner Verbrennerbetrieb beim PHEV = Verbrauch des mitgeführten chemischen Energieträgers
DB AG	Deutsche Bahn AG
DISI	Direct Injection Spark Ignition
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
EEA	European Environmental Agency (deutsch: „Europäische Umweltagentur“)
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
ETS	EU-Emissionshandel (European Emission Trading System)
FOCA	Federal Office of Civil Aviation (Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL)
HB	Halterbefragung: Inländerfahrleistung der Fahrleistungserhebung
HC	Kohlenwasserstoffe
ICAO	International Civil Aviation Organization (Internationale Zivilluftfahrtorganisation)
LOS	Level of Service, Verkehrszustand
LPG	Liquefied Petroleum Gas
LTO	Landing and Take-off Cycle (Betriebsphase unterhalb 3.000 Fuß)
LVm	Motorisierter Leichtverkehr (Straßenverkehrszählung 2015)
MTOW	Maximum Take Off Weight (Höchstabfluggewicht)
NO_x	Stickstoffoxid

Abkürzung	Beschreibung
PM	Partikel (PM ₁₀)
SVZ	Manuelle Straßenverkehrszählung der BAST
TREMOD	Transport Emission Model
VE-BFS	Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen: Auswertung der automatische Zählstellen für die BAST
VIZ	Verkehr in Zahlen
VZ	Verkehrszählung: Inlandsfahrleistung der Fahrleistungserhebung 2014
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht

Zusammenfassung

Im Rahmen des aktuellen Vorhabens wurden die aktuellen Daten zur Berechnung der Emissionen des Verkehrs bis zum Bezugsjahr 2018 in das TREMOD-Modell aufgenommen. Die mit Hilfe dieses Modells berechneten Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen sind u.a. Grundlage der deutschen Emissionsberichterstattung für den Sektor „Verkehr“ und mobile Maschinen und Geräte, welche unter anderem dem Sektor „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ zugeordnet sind.

Die Datenbasis wurde aufgrund neuer Verkehrsdaten, neuer Emissionsfaktoren und aktueller Statistiken zum Kraftstoffabsatz fortgeschrieben. Dazu wurden alle emissionsrelevanten Daten aufbereitet und in die Modelle TREMOD und TREMOD-MM eingearbeitet. Anschließend wurden die Verbrauchs- und Emissionszeitreihen bis 2018 neu berechnet. Weiterhin wurde das im Jahr 2018 überarbeitete Trendszenario fortgeschrieben.

In diesem Bericht werden die Arbeiten für TREMOD beschrieben. Der Bereich „Mobile Maschinen“ und die Aktualisierung von TREMOD-MM werden in einem separaten Bericht beschrieben.

Aktualisierung Straßenverkehr

Aktualisierung der Kfz-Bestandsdaten auf Basis der Daten des KBA

Die Bestands- und Neuzulassungsdaten für TREMOD werden jährlich vom KBA als Sonderauswertung bezogen. Die Daten für das Jahr 2018 (Bestand zum 1.1.2019 und Neuzulassungen im Jahr 2018) wurden für TREMOD aufbereitet. Hierbei wurden methodische Neuerungen in der KBA-Statistik umgesetzt. Dazu zählen z.B. neue Antriebe und Emissionsstufen, insbesondere die Differenzierung der Emissionen von PKW Euro 6 nach Euro 6a/b/c/d-temp/d: Seit Erweiterung der Emissionsgesetzgebung für Euro 6 PKW durch die sogenannte RDE (real-world emission) Regulierung ist die Euro 6-Norm weiter zu unterteilen, da neuere Euro 6-Fahrzeuge strengere Prüfvorschriften erfüllen müssen.

Übernahme aller Emissionsfaktoren aus dem HBEFA 4.1

HBEFA 4.1 ist ein "großes" Update und enthält einen vollständig überarbeiteten Emissionsfaktorendatensatz, der in TREMOD übernommen wurde. Die Emissionsfaktoren für die bisherigen und die neuen Subsegmente wurden aus dem HBEFA 4.1 übernommen und die Bestands- und Fahrleistungsdaten entsprechend differenziert. Darüber hinaus wurden die im HBEFA 4.1 berücksichtigten Softwareupdates von Diesel Euro 5 Pkw bei der Bestandsentwicklung und den Emissionsänderungen in TREMOD integriert.

Aktualisierung der durchschnittlichen CO₂-Emissionen neu zugelassener PKW und leichter Nutzfahrzeuge auf Basis der Daten des KBA und der im UBA-Forschungsprojekt 37 16 58 180 0 entwickelten „Methode zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs von Kfz“

Im genannten Forschungsprojekt wurden die spezifischen Kraftstoffverbräuche von Straßenfahrzeugen für TREMOD auf Basis aktueller Daten zum Realverbrauch überprüft und eine Methodik zu deren Berücksichtigung in den Emissionsfaktoren von TREMOD und dem HBEFA entwickelt. Die aktuelle Methodik und die Emissionsfaktoren des neuen HBEFA 4.1 wurden in TREMOD übernommen.

Überarbeitung der Fahrleistungen auf Basis der im Projekt „Überleitung der Fahrleistungserhebung nach TREMOD“ (i.A. der BASt) entwickelten Methodik

Im genannten Forschungsprojekt wurden die Fahrleistungen für Straßenfahrzeuge in TREMOD auf Basis der Ergebnisse der Fahrleistungserhebung 2014 und weiterer Recherchen aktualisiert. Die neuen Daten wurden in TREMOD übernommen und bis 2018 fortgeschrieben.

Aktualisierung der Berechnungsmodule zum Stromverbrauch im Straßenverkehr sowie AdBlue-Verbrauch

Der Stromverbrauch des Straßenverkehrs sowie der Verbrauch und die damit bedingten CO₂-Emissionen durch AdBlue werden in TREMOD als separate Ergebnisabfragen dargestellt. Die hierfür nötigen Eingangsdaten – für Bestand, Fahrleistung und spezifischer Verbrauch von elektrischen Fahrzeugen; für AdBlue der Anteil von Fahrzeugen mit SCR-Systemen – wurden aktualisiert und die Ergebnisse bis 2018 fortzuschreiben.

Aktualisierung Schienenverkehr

Aktualisierung der baureihenspezifischen Emissionsfaktoren im Modul „Schienenverkehr“ gemäß Datenlieferung der DB AG

Die baureihenspezifischen Emissionsfaktoren werden vom Bahn-Umwelt-Zentrum zur Verfügung gestellt. Diese wurden aufbereitet und in die entsprechenden TREMOD-Tabellen eingespielt.

Aktualisierung der Verkehrs- und Betriebsleistungen der DB AG

Die Verkehrsdaten wurden bis zum Jahr 2018 aktualisiert. Hierzu wurden verschiedene Statistiken (DESTATIS, Verkehr in Zahlen, DB AG u.a.) verwendet. Im Einzelnen handelt es sich um folgende Parameter: Verkehrsleistungen, Betriebsleistungen und Auslastungsgrade. Für die DB AG stammen sie aus Auswertungen des Bahn-Umwelt-Zentrums.

Plausibilisierung des Verkehrs- und Betriebsleistungsgerüsts sowie der spezifischen Energieverbrauchswerte und Emissionsfaktoren der sonstigen Bahnen (außer DB AG)

Zur Aktualisierung der Verkehrsdaten der übrigen Bahnen bis 2018 wurde im Wesentlichen auf die VDV-Statistik, die Bahnstatistik des statistischen Bundesamtes und die Marktuntersuchung Eisenbahnverkehr der Bundesnetzagentur zurückgegriffen. Die spezifischen Energie- und Emissionsfaktoren wurden mit den entsprechenden Kennzahlen der DG AG abgeglichen und im Rahmen der Gesamtbetrachtung des Eisenbahnverkehrs plausibilisiert. Die Kennzahlen der städtischen Bahnen beruhen im Wesentlichen auf der VDV-Statistik und Fortschreibungen der spezifischen Verbrauchsdaten auf Basis von Unternehmensbefragungen des VDV.

Aktualisierung Binnenschifffahrt

Aktualisierung der Verkehrsleistungsdaten der Binnenschifffahrt gemäß den im Projekt „Aktualisierung der Emissionsberechnung für die Binnenschifffahrt“ (FKZ 37 1145 105) entwickelten Strukturen

Die Verkehrsleistungsdaten der Binnenschifffahrt für TREMOD werden aus der Güterstatistik der Binnenschifffahrt des statistischen Bundesamtes in Form einer jährlichen Sonderabfrage bezogen. Für die Fortschreibung bis zum Jahr 2018 wurde eine Datenanfrage an das statistische Bundesamt gestellt und die Daten aus der Sonderauswertung für TREMOD aufbereitet.

Überarbeitung der Flottenzusammensetzung und Altersverteilung der Motoren (Literaturrecherche und Anfrage bei relevanten Organisationen/Institutionen)

Die Flottenzusammensetzung und Altersverteilung der Motoren für Binnenschiffe wurde zuletzt im Jahr 2013 in der Studie „Aktualisierung der Emissionsberechnung für die Binnenschifffahrt

und Übertragung der Daten in TREMOD“ für das UBA erhoben. Seither wurden die Daten aus den Annahmen des Trendszenarios fortschrieben. Die Annahmen wurden durch aktuelle empirische Daten überprüft und aktualisiert. Hierfür wurden die zuständigen Zulassungsbehörden und weitere Experten kontaktiert. Bei Bedarf werden ergänzend Literaturrecherchen durchgeführt.

Aktualisierung der spezifischen Verbrauchswerte und Emissionsfaktoren für verschiedene Schiffstypen/Motoren unter Berücksichtigung der EU-Forschungsprojekte „PROMINENT“ und „CLINSH“

Die spezifischen Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für Binnenschiffe wurden zuletzt im Jahr 2013 in der Studie „Aktualisierung der Emissionsberechnung für die Binnenschifffahrt und Übertragung der Daten in TREMOD“ für das UBA erhoben. Grundlage waren Literaturrecherchen und Emissionsmessungen im offiziell gültigen Typpengenehmigungsprüfzyklus. Forschungsbedarf besteht aktuell vor allem beim Kraftstoffverbrauch und den Emissionen im realen Betrieb und bei neueren Schiffen und Motoren. Die bisherigen Annahmen sollen durch aktuelle Studien überprüft und aktualisiert werden. Unter anderem werden die genannten EU-Forschungsprojekte „PROMINENT“ und „CLINSH“ berücksichtigt, sofern deren Ergebnisse für das Forschungsprojekt bezogen werden können.

Aktualisierung Flugverkehr

Die Grundlagen für den Flugverkehr wurden in dem separaten Vorhaben „Revision des Modells TREMOD Aviation, 2019“ (Projektnummer 118 621) aktualisiert und fortgeschrieben. Dabei wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- ▶ Anpassungen von Flugzeugenndaten
 - Integration neuer Flugzeugtypen
 - Überarbeitung der zulässigen Startgewichte
 - Überarbeitung der zulässigen Kapazitäten (Sitzplätze und maximale Nutzlast)
- ▶ Anpassungen der Emissionsfaktoren
 - Integration neuer Flugzeugtypen
 - Anpassungen von unzureichend definierten und generischen Flugzeugtypen (lediglich über zulässiges Startgewicht definiert)
 - Überprüfung einer Integration unterschiedlicher Turbinentypen bei einem Flugzeugtyp in TREMOD AV
 - Überprüfung einer Integration von Effizienzsteigerungen eines Flugzeugtypens in TREMOD AV
- ▶ Ermittlung flughafenspezifische Emissionen
 - Bestimmung der LTO-Emissionen für alle Hauptverkehrsflughäfen Deutschlands
 - Berücksichtigung der flughafenspezifischen Taxi-Zeiten in der Emissionsberechnung

- ▶ Detailliertere Abbildung des Flugverkehrs auf sonstigen Flugplätzen und des nicht gewerblichen Flugverkehrs
 - Verbesserte Berücksichtigung generischer Flugzeugtypen (lediglich über zulässiges Startgewicht definiert)
 - Berücksichtigung von Flugdistanzen

Aktualisierung Trendszenario

Anpassung des Verkehrs- und Fahrleistungsgerüst an aktuelle Trends

Das Trendszenario wurde Ende 2018 im Rahmen des Projekts Nr. 110 871 aktualisiert. Mit der Aktualisierung auf das Jahr 2018 ändert sich das Startjahr der Szenarienrechnung in TREMOD. Die Trendentwicklung wurde daher bei allen Verkehrsträgern und Verkehrsarten auf das aktuelle Basisjahr angepasst. Neue Erkenntnisse wurden ebenso berücksichtigt (siehe folgender Absatz).

Überprüfung und ggf. Anpassung aller im Forschungsprojekt Sachverständigen Projekt 110 871 abgeleiteten Szenario-Annahmen (Verkehrs-, Fahrzeug- und Energiedaten, Emissionsfaktoren)

Es wurden alle Annahmen des Szenarios überprüft. Die Flottenentwicklungen wurden in Abstimmung mit den Annahmen zur Effizienzentwicklung im Rahmen der Arbeiten für das HBEFA 4.1 geringfügig angepasst. Grund dafür sind die Effizienzentwicklungen der neuen Fahrzeugkonzepte aufgrund der Erkenntnisse aus den HBEFA 4.1, die ebenfalls übernommen wurden.

Überarbeitung Datenbank TREMOD

Die aktualisierten Daten wurden schließlich so aufbereitet, dass sie an die entsprechenden TREMOD -Tabellen angefügt werden können. Die Aufbereitung erfolgt in mehreren Excel-Files für die einzelnen Sektoren und Datenarten (Verkehrsdaten, Energie- und Emissionskennzahlen), die wiederum jeweils Daten für verschiedene TREMOD-Tabellen enthalten. Die Tabellen wurden in TREMOD importiert und anschließend auf Konsistenz und Vollständigkeit überprüft. Zur Aktualisierung waren insbesondere die folgenden Schritte notwendig:

- ▶ Aktualisierung der Kraftstoffverbrauchsdaten für alle Verkehrsträger anhand der Energiebilanzen und der Statistiken des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
- ▶ Aktualisierung der Biokraftstoffmengen und Anteile je Verkehrsmittel (auch im Szenario)
- ▶ Überführung sämtlicher aktualisierter Daten in die Datenbanken TREMOD
- ▶ Neuberechnung der Verbrauchs- und Emissionszeitreihen 1990-2050
- ▶ Zuordnung von auf Kraftstoffabsätze (laut Energiebilanz) bezogenen Emissionen zu den ermittelten inlandsbezogenen Emissionen
- ▶ Anpassung der Schnittstelle TREMOD-ZSE (Zentrales System Emissionen des UBA) dahingehend, dass eine nach Euro-Normen spezifizierte Ausgabe statt der bisherigen beiden Kategorien „mit/ohne Minderungstechnik“ erfolgt

- ▶ Übergabe der Daten für die Emissionsberichterstattung an das UBA mittels ZSE-Schnittstelle.

Ergebnisse

Die Neuberechneten Ergebnisse weichen zum Teil deutlich von den bisherigen Ergebnissen ab:

- ▶ In TREMOD 6.0 wurden die Fahrleistungen gegenüber TREMOD 5.8 aufgrund der Ergebnisse der Fahrleistungserhebung 2014 und anderer aktueller Quellen geändert. Bei den Pkw sind die Fahrleistungen bis 2014 ähnlich hoch und bis 2018 etwas niedriger als bisher. Bei den schweren Nutzfahrzeugen sind die Fahrleistungen aufgrund der Ergebnisse der Fahrleistungserhebung 2014 durchgehend höher. Bei den leichten Nutzfahrzeugen ist seit 2014 ein stärkerer Anstieg der Fahrleistungen zu beobachten.
- ▶ Die aktualisierte Modellierung im HBEFA 4.1 führt bei allen Fahrzeugkategorien zu höheren Energieverbrauchs Faktoren. Bei den Pkw und LNF nehmen die Unterschiede im Zeitverlauf zu. Grund dafür sind die zunehmenden Differenzen zwischen dem realen Kraftstoffverbrauch und den Testzykluswerten. Die Änderung des Inlandsverbrauchs der TREMOD-Version 6.0 gegenüber der Version 5.8 wird dominiert durch die Änderungen der spezifischen Verbrauchswerte, die deutlich größer ist als die Unterschiede bei den Fahrleistungen. Die Unterschiede gegenüber der Version 5.8 nehmen daher dementsprechend im Zeitverlauf zu und liegen im Jahr 2017 fast 10 % höher.
- ▶ Die Stickstoffoxidemissionen gehen im betrachteten Zeitraum deutlich zurück. Allerdings ist der Rückgang bei den Pkw durch den zunehmenden Anteil der Diesel-Pkw seit dem Jahr 2000 gestoppt worden. In der Version 5.8 war noch von einem deutlich stärkeren Rückgang der NO_x-Emissionen ausgegangen worden. Die mit dem HBEFA 4.1 abgeleiteten Emissionsfaktoren führen somit im Ergebnis ab dem Jahr 2000 zu deutlich höheren NO_x-Emissionen. Im Jahr 2018 sind die NO_x-Emissionen um rund 30 % höher als bisher berechnet wurde.
- ▶ Die spezifischen Abgas-Partikelemissionen gehen über den gesamten Zeitraum aufgrund der mit der Abgasgesetzgebung verbundenen Verwendung von effizienten Partikelfiltern bei fast allen modernen Fahrzeugkonzepten mit Dieselmotor deutlich zurück. Im Vergleich mit der Version 5.8 liegen sind alle Emissionsfaktoren nun höher. Diese Änderungen zeigen sich auch bei den Gesamtemissionen. Anders als bei den Stickstoffoxidemissionen gibt es jedoch insgesamt keine wesentliche Änderung im Entwicklungstrend.

Summary

Within the framework of the current project, the current data for the calculation of transport emissions up to the reference year 2018 were included in the TREMOD model. The emissions of greenhouse gases and air pollutants calculated with the help of this model are, among other things, the basis for German emissions reporting for the "Transport" sector and mobile machinery and equipment, which are allocated to the "Trade, commerce, services" sector.

The database was updated on the basis of new traffic data, new emission factors and current statistics on fuel sales. For this purpose, all emission-relevant data were prepared and incorporated into the TREMOD and TREMOD-MM models. The consumption and emission time series up to 2018 were then recalculated. Furthermore, the trend scenario revised in 2018 was updated.

This report describes the work for TREMOD. The area "Mobile Machines" and the update of TREMOD-MM are described in a separate report.

Update road transport

Updating vehicle inventory data on the basis of KBA data

The inventory and new registration data for TREMOD is obtained annually by the KBA as a special evaluation. The data for the year 2018 (stock on 1.1.2019 and new registrations in 2018) have been prepared for TREMOD. Methodological innovations were implemented in the KBA statistics. These include, for example, new technologies and emission levels, in particular the differentiation of emissions from Euro 6 passenger cars to Euro 6a/b/c/d-temp/d: Since the extension of the emission legislation for Euro 6 passenger cars by the so-called RDE (real-world emission) regulation, the Euro 6 standard has to be further subdivided since newer Euro 6 vehicles have to comply with stricter test regulations.

Adoption of all emission factors from HBEFA 4.1

HBEFA 4.1 is a "major" update and contains a completely revised emission factor data set, which was adopted in TREMOD. The emission factors for the previous and the new subsegments were taken from HBEFA 4.1 and the inventory and driving performance data differentiated accordingly. In addition, the software updates of Diesel Euro 5 Passenger Cars considered in HBEFA 4.1 were integrated into TREMOD during inventory development and emission changes.

Updating the average CO₂ emissions of newly registered passenger cars and light commercial vehicles on the basis of data from the KBA and the "Method for determining the fuel consumption of motor vehicles" developed in the UBA research project 37 16 58 180 0.

In the mentioned research project, the specific fuel consumption of road vehicles for TREMOD was checked on the basis of current data on real consumption and a methodology was developed for its consideration in the emission factors of TREMOD and HBEFA. The current methodology and the emission factors of the new HBEFA 4.1 were adopted in TREMOD.

Revision of the driving performance on the basis of the methodology developed in the project "Transfer of the driving performance survey to TREMOD" (on behalf of BAST).

In the mentioned research project, the driving performance for road vehicles in TREMOD was updated on the basis of the results of the Mileage Survey 2014 and further research. The new data were transferred to TREMOD and updated until 2018.

Updating of the calculation modules for electricity consumption in road traffic and AdBlue consumption

The electricity consumption of road traffic as well as the consumption and the resulting CO₂ emissions by AdBlue are presented in TREMOD as separate result queries. The necessary input data - for inventory, mileage and specific consumption of electric vehicles; for AdBlue the proportion of vehicles with SCR systems - were updated and the results updated until 2018.

Rail transport update

Updating of the series-specific emission factors in the "Rail Traffic" module in accordance with data supplied by DB AG

The series-specific emission factors are provided by the Rail Environment Centre. These have been prepared and imported into the corresponding TREMOD tables.

Updating the transport and operating services of DB AG

Traffic data have been updated up to 2018. Various statistics (DESTATIS, Verkehr in Zahlen, DB AG, etc.) were used for this purpose. These are the following parameters: Transport performance, operating performance and utilisation rates. For DB AG, they are derived from evaluations carried out by the Rail Environment Centre.

Plausibility checks of the traffic and operating performance framework as well as the specific energy consumption values and emission factors of the other railways (except DB AG)

In order to update the traffic data of the other railways until 2018, the main sources used were the VDV statistics, the rail statistics of the Federal Statistical Office and the rail transport market study of the Federal Network Agency. The specific energy and emission factors were compared with the corresponding key figures of DG AG and checked for plausibility as part of the overall analysis of rail traffic. The key figures for municipal railways are essentially based on VDV statistics and updates of specific consumption data on the basis of VDV company surveys.

Updating inland navigation

Update of transport performance data for inland navigation according to the structures developed in the project "Update of emission calculation for inland navigation" (FKZ 37 1145 105).

The transport performance data of inland navigation for TREMOD are obtained from the freight statistics of inland navigation of the Federal Statistical Office in the form of an annual special survey. A data request was sent to the Federal Statistical Office for updating until 2018 and the data from the special evaluation were prepared for TREMOD.

Revision of the fleet composition and age distribution of the engines (literature research and enquiry to relevant organisations / institutions)

The fleet composition and age distribution of engines for inland waterway vessels was last surveyed for the UBA in 2013 in the study "Updating the calculation of emissions for inland waterway transport and transfer of data to TREMOD". Since then, the data from the assumptions of the trend scenario have been updated. The assumptions were checked and updated using current empirical data. For this purpose, the responsible approval authorities and other experts were contacted. If necessary, additional literature searches are carried out.

Update of the specific consumption values and emission factors for different ship types/engines under consideration of the EU research projects "PROMINENT" and "CLINSH".

The specific consumption and emission factors for inland waterway vessels were last collected in 2013 in the study "Updating the calculation of emissions for inland waterway transport and transfer of data to TREMOD" for UBA. It was based on literature research and emission measurements in the officially valid type approval test cycle. There is currently a need for research above all into fuel consumption and emissions in real operation and for newer ships and engines. The previous assumptions are to be checked and updated by current studies. Among other things, the EU research projects "PROMINENT" and "CLINSH" mentioned above will be taken into account if their results can be obtained for the research project.

Updating air traffic

The principles for air traffic were updated and updated in the separate project "Revision of the Model TREMOD Aviation, 2019" (project number 118 621). The following work was carried out:

- ▶ Adaptation of aircraft characteristics
 - Integration of new aircraft types
 - Revision of the permissible take-off weights
 - Revision of permissible capacities (seating capacity and maximum payload)
- ▶ Adjustment of emission factors
 - Integration of new aircraft types
 - Adaptation of insufficiently defined and generic aircraft types (only defined by permissible take-off weight)
 - Verification of an integration of different turbine types in an aircraft type in TREMOD AV
 - Review of an integration of efficiency enhancements of an aircraft type into TREMOD AV
- ▶ Determination of airport-specific emissions
 - Determination of LTO emissions for all major airports in Germany
 - Consideration of airport-specific taxi times in the emission calculation
- ▶ More detailed presentation of air traffic at other aerodromes and non-commercial air traffic
 - Improved consideration of generic aircraft types (only defined by permissible take-off weight)
 - Consideration of flight distances

Update trend scenario

Adaptation of the traffic and mileage scaffolding to current trends

The trend scenario was updated at the end of 2018 as part of Project No 110 871. The update to 2018 changes the start year of the scenario calculation in TREMOD. The trend development for

all modes of transport has therefore been adjusted to the current base year. New findings were also taken into account (see following paragraph).

Review and if necessary adjustment of all scenario assumptions derived in the research project Expert Project 110 871 (traffic, vehicle and energy data, emission factors)

All assumptions of the scenario were reviewed. Fleet developments were slightly adjusted in line with the efficiency development assumptions in the HBEFA 4.1 work. This is due to the efficiency developments of the new vehicle concepts based on the findings of HBEFA 4.1, which were also adopted.

Revision of TREMOD database

The updated data was finally prepared in such a way that it can be appended to the corresponding TREMOD tables. The preparation is carried out in several Excel files for the individual sectors and data types (traffic data, energy and emission indicators), which in turn contain data for different TREMOD tables. The tables were imported into TREMOD and then checked for consistency and completeness. In particular, the following steps were necessary to update the tables:

- ▶ Updating the fuel consumption data for all modes of transport using the energy balances and the statistics of the Federal Office of Economics and Export Control
- ▶ Update of biofuel quantities and proportions per mode of transport (also in the scenario)
- ▶ Transfer of all updated data to the TREMOD databases
- ▶ Recalculation of consumption and emission time series 1990-2050
- ▶ Allocation of emissions related to fuel sales (according to energy balance) to determined domestic emissions
- ▶ Adaptation of the TREMOD-ZSE interface (Central Emissions System of the UBA) so that a version specified in accordance with Euro standards is issued instead of the previous two categories "with/without reduction technology"
- ▶ Transfer of data for emissions reporting to UBA via ZSE interface.

Results

Some of the recalculated results deviate significantly from the previous results:

- ▶ In TREMOD 6.0 the mileage was changed compared to TREMOD 5.8 due to the results of the mileage survey 2014 and other current sources. For passenger cars, the mileage will be similarly high until 2014 and somewhat lower than before until 2018. For heavy commercial vehicles, mileage is consistently higher due to the results of the 2014 Mileage Survey. For light commercial vehicles, a stronger increase in mileage has been observed since 2014.
- ▶ The updated modelling in HBEFA 4.1 leads to higher energy consumption factors for all vehicle categories. For passenger cars and LNF, the differences increase over time. This is due to the increasing differences between real fuel consumption and test cycle values. The change in domestic consumption of TREMOD version 6.0 compared to version 5.8 is dominated by the changes in specific consumption values, which are significantly greater

than the differences in performance. The differences from version 5.8 therefore increase accordingly over time and are almost 10 % higher in 2017.

- ▶ Nitrogen oxide emissions will fall significantly in the period under review. However, the decline in passenger car emissions has been halted by the increasing share of diesel passenger cars since 2000. Version 5.8 had assumed a much greater reduction in NO_x emissions. The emission factors derived from the HBEFA 4.1 thus result in significantly higher NO_x emissions from the year 2000 onwards. In 2018, NO_x emissions will be around 30 % higher than previously calculated.
- ▶ The specific exhaust particle emissions decrease significantly over the entire period due to the use of efficient particle filters in almost all modern diesel engine vehicle concepts in connection with exhaust gas legislation. Compared with version 5.8, all emission factors are now higher. These changes are also reflected in the total emissions. In contrast to nitrogen oxide emissions, however, there is no significant change in the overall development trend.

1 Übersicht

Das Emissionsberechnungsmodell „TREMOD“ (Transport Emission Model) bildet den motorisierten Verkehr in Deutschland hinsichtlich seiner Verkehrs- und Fahrleistungen, Energieverbräuche und den zugehörigen Luftschadstoffemissionen für den Zeitraum 1960 bis 2050 ab. Das aktuelle Vorhaben diente der Aktualisierung und Ergänzung von TREMOD. Für alle Verkehrsträger wurden die Bestands- und Fahr- und Verkehrsleistungsdaten bis zum Jahr 2018 fortgeschrieben. Anschließend wurde das Trendszenario bis zum Jahr 2050 aktualisiert.

Die aktuelle Fortschreibung der Basisdaten bis zum Jahr 2018 und die Aktualisierung des Trendszenarios wurde in der TREMOD-Version 6.03 vom 31.01.2020 realisiert.

2 Aktualisierung der Zeitreihe 1990-2018

2.1 Verkehrsträgerübergreifende Kennzahlen

2.1.1 Energetische Kennzahlen und Umrechnungsfaktoren

In TREMOD liegen die spezifischen Verbrauchswerte für Kraftstoffe zum Teil in massenbezogenen Einheiten vor (Gramm, kg). Da sich Kraftstoffe in ihrem Energieinhalt und ihrer Dichte voneinander unterscheiden, ist die massenbezogene Angabe des Energieverbrauchs vor allem dann problematisch, wenn Mischkraftstoffe betrachtet werden (z.B. mit beigemischten Biokraftstoffen) oder verschiedene Kraftstoffe aufsummiert werden. In diesem Fall ist der Bezug auf den Energieinhalt eindeutig. Das HBEFA 4.1 (Notter et al. 2019) liefert die spezifischen Verbrauchswerte in MJ/km. Diese werden direkt in TREMOD übernommen. Unter der Annahme, dass der Verbrauch in MJ/km für alle Kraftstoffvarianten einer Antriebsart gleich ist, gelten die Verbrauchswerte unabhängig vom Grad der Beimischung von Biokraftstoffen.

In TREMOD erfolgen die Bilanzierung der Ergebnisse, die Angabe von Beimischungsanteilen und die Berechnung der CO₂-Emissionen und Energievorketten grundsätzlich auf Basis des Energieinhaltes in Joule (meist MJ). Die Darstellung in kg oder Liter dient v.a. der besseren Verständlichkeit. In diesem Fall sollte man jedoch vermeiden, verschiedene Kraftstoffe aufzusummieren.

Die wichtigsten verwendeten Energiekennzahlen sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 1: Energiekennzahlen für Kraftstoffe

	Benzin	Diesel	Kerosin	Ethanol	Bio-diesel	Pflanzenöl	Erdgas/Biogas	Flüssiggas
Heizwert (MJ/kg)	42,280	42,960	42,800	26,68	37,242	37,242	46,500	45,969
Dichte (kg/l)	0,742	0,832	0,8	0,79	0,879	0,92	*	0,600

Anmerkungen: Heizwert Diesel bis 1992: 42.704 MJ/kg; Kerosin bis 2003:43 MJ/kg; Heizwert Benzin bis 2014: 43,543 MJ/kg

*Dichte Erdgas: 0,716 kg/m³

Quellen: AG Energiebilanzen (Benzin, Diesel, Kerosin, Flüssiggas und Heizwert Biodiesel, Pflanzenöl und Ethanol), BAFA (Dichte Biodiesel, Pflanzenöl und Ethanol); Erdgas: HBEFA 3.3

Mit dieser Festlegung sind Änderungen des Heizwerts in der Energiestatistik im Zeitverlauf zu beachten. Denn die vom HBEFA gelieferten Verbrauchswerte in MJ beziehen sich auf den Zertifizierungskraftstoff, der bei den Emissionsmessungen verwendet wird. Dieser hat ggf. andere Kraftstoffeigenschaften als in den nationalen Energiebilanzen und in der Emissionsberichterstattung verwendet wird. Die folgende Tabelle enthält die Kennzahlen für den Zertifizierungskraftstoff.

Tabelle 2: Kennzahlen der Zertifizierungskraftstoffe im HBEFA

Kraftstoff	Dichte (kg/l)	Heizwert (MJ/kg)	CO ₂ -Faktor (kg/kg)	CO ₂ -Faktor (kg/TJ)
Benzin (E5)	0,746	42,335	3,104	73.325
Diesel (B7)	0,836	42,685	3,133	73.399

Quelle: HBEFA 4.1

Im HBEFA und in TREMOD werden somit für die Berechnung des massen- oder volumenbezogenen Verbrauchs, aber auch zur Berechnung der CO₂- und SO₂-Emissionen, die Verbrauchswerte in MJ auf Basis des Zertifizierungskraftstoffs mit den länderspezifischen Kennzahlen (Heizwert, Dichte, aber auch CO₂ und SO₂) verknüpft. Hierbei ist darauf zu achten, dass die länderspezifischen Emissionsfaktoren mit diesem Vorgehen konsistent sind (siehe Kapitel 2.1.2).

2.1.2 Kohlendioxidemissionen

Für die Berechnung der direkten CO₂-Emissionen werden kraftstoffbezogene Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes, bezogen auf den Energieinhalt der Kraftstoffe, verwendet.

Die direkten CO₂-Emissionen der Biokraftstoffe werden ebenfalls berechnet und ausgewiesen. Eine Unterscheidung zwischen regenerativen und fossilen CO₂-Emissionen wird nicht vorgenommen. Der CO₂-Vorteil der Biokraftstoffe gegenüber fossilen Kraftstoffen ergibt sich, wenn die Vorkettenemissionen einbezogen werden (siehe Kapitel 3.7).

Die CO₂-Emissionsfaktoren für die Kraftstoffe und Gase wurden im Jahr 2018 vom Umweltbundesamt aktualisiert und gehen aus der folgenden Tabelle hervor.

Tabelle 3: CO₂-Emissionsfaktoren für Kraftstoffe und Gase (in kg/TJ)

	Benzin	Diesel	Ethanol	Bio-diesel	Flüssig-gas	Erdgas	Biogas	Kerosin	Flug-benzin
1990		74.027			65.559		90.584	73.256	70.000
1991		74.027			65.557		90.584	73.256	70.000
1992		74.027			65.543		90.584	73.256	70.000
1993		74.027			65.368		90.584	73.256	70.000
1994	73.069	74.027			65.326		90.584	73.256	70.000
1995	73.075	74.027		70.800	65.334	55.759	90.584	73.256	70.000
1996	73.076	74.027		70.800	65.212	55.800	90.584	73.256	70.000
1997	73.073	74.027		70.800	65.205	55.846	90.584	73.256	70.000
1998	73.079	74.027		70.800	65.230	55.825	90.584	73.256	70.000
1999	73.086	74.027		70.800	64.041	55.838	90.584	73.256	70.000
2000	73.094	74.027		70.800	64.404	55.847	90.584	73.256	70.000
2001	73.095	74.027		70.800	64.505	55.883	90.584	73.256	70.000
2002	73.095	74.027		70.800	64.376	55.892	90.584	73.256	70.000
2003	73.094	74.027		70.800	64.955	55.867	90.584	73.256	70.000
2004	73.099	74.027	71.607	70.800	65.262	55.858	90.584	73.256	70.000
2005	73.103	74.027	71.607	70.800	65.295	55.885	90.584	73.256	70.000
2006	73.106	74.027	71.607	70.800	65.361	55.869	90.584	73.256	70.000
2007	73.107	74.027	71.607	70.800	66.608	55.853	90.584	73.256	70.000
2008	73.116	74.027	71.607	70.800	65.225	55.868	90.584	73.256	70.000

	Benzin	Diesel	Ethanol	Bio-diesel	Flüssig-gas	Erdgas	Biogas	Kerosin	Flug-benzin
2009	73.119	74.027	71.607	70.800	65.254	55.932	90.584	73.256	70.000
2010	73.119	74.027	71.607	70.800	65.330	55.928	90.584	73.256	70.000
2011	73.025	74.027	71.607	70.800	65.395	55.934	90.584	73.256	70.000
2012	73.088	74.027	71.607	70.800	65.399	55.917	90.584	73.256	70.000
2013	73.091	74.027	71.607	70.800	65.413	55.944	90.584	73.256	70.000
2014	73.091	74.027	71.607	70.800	65.461	55.936	90.584	73.256	70.000
2015	75.289	74.027	71.607	70.800	66.346	55.936	90.584	73.256	70.000
2016	75.286	74.027	71.607	70.800	66.334	55.936	90.584	73.256	70.000
2017	75.286	74.027	71.607	70.800	66.334	55.936	90.584	73.256	70.000
2018	75.286	74.027	71.607	70.800	66.334	55.936	90.584	73.256	70.000

Anmerkungen: Änderung bei Benzin ab 2015 aufgrund der Änderung des Heizwerts durch die AG Energiebilanzen
Quelle: Umweltbundesamt

Mit der Heizwertänderung bei Benzin ab 2015 hat das Umweltbundesamt den energiebezogenen CO₂-Emissionsfaktor angepasst, so dass das Emissionsniveau bezogen auf die Kraftstoffmasse gleich bleibt. Da in TREMOD die Verbrauchswerte in MJ vorgegeben werden, würden als Folge die in TREMOD berechneten CO₂-Emissionen bei gleichem Energieverbrauch höher berechnet werden. Um aber weiterhin mit den länderspezifischen Kraftstoffkennzahlen und CO₂-Bilanzen kompatibel zu sein, wurde in TREMOD der spezifische Verbrauch aller Benzin nutzenden Fahrzeuge ab dem Jahr 2015 um die Heizwertänderung nach unten korrigiert (-2,9 %). Damit sind die CO₂-Emissionen sowie der energie-, massen- und volumenbezogene Kraftstoffverbrauch konsistent mit der deutschen Energie- und Emissionsstatistik, weisen aber einen Bruch im Verlauf der spezifischen Verbrauchsfaktoren bei allen benzinbetriebenen Fahrzeugen in den Jahren nach 2015 gegenüber den Vorjahren auf.

2.1.3 Schwefeldioxid- und Bleiemissionen

Die direkten Emissionen von Schwefeldioxid und Blei werden verursacht durch die in den Kraftstoffen enthaltenen Schwefel- und Bleianteile. Aufgrund der Gesetzgebung gibt es seit 1997 nur noch bleifreie Ottokraftstoffe und der Schwefelgehalt wurde stufenweise reduziert, so dass ab 2003 nur noch schwefelarme Kraftstoffe im Straßen- und Schienenverkehr zugelassen sind. Bei der Schifffahrt gelten andere gesetzliche Bestimmungen. Erst ab 2011 sind bei der Binnenschifffahrt schwefelarme Kraftstoffe vorgeschrieben. Beim Flugverkehr wurde eine aktuelle Recherche durchgeführt, um den Schwefelgehalt von Kerosin zu bestimmen

Tabelle 4: Blei- und SO₂-Emissionsfaktoren für Kraftstoffe und Gase im Verkehr (in kg/TJ)

Year	Benzin Blei (kg/TJ)	Benzin SO ₂ (kg/TJ)	Diesel Straße und Bahn SO ₂ (kg/TJ)	Diesel Binnenschifffahrt SO ₂ (kg/TJ)
1990	0,966	10,214	79,616	86,364
1991	0,680	10,214	60,883	60,883
1992	0,475	10,214	60,883	60,883

Year	Benzin Blei (kg/TJ)	Benzin SO ₂ (kg/TJ)	Diesel Straße und Bahn SO ₂ (kg/TJ)	Diesel Binnenschifffahrt SO ₂ (kg/TJ)
1993	0,370	10,214	60,521	60,521
1994	0,245	10,214	60,521	60,521
1995	0,179	8,357	60,521	60,521
1996	0,097	8,357	27,933	60,521
1997	0,001	8,357	18,622	60,521
1998	0	7,660	16,760	60,521
1999	0	6,964	15,363	60,521
2000	0	3,250	13,966	60,521
2001	0	2,553	11,639	60,521
2002	0	1,161	1,862	60,521
2003-2010	0	0,371	0,372	60,521
Ab 2011	0	0,371	0,372	0.372

Anmerkungen: Für Bioethanol und Biodiesel werden die SO₂-Faktoren von Benzin und Diesel verwendet; SO₂-Faktor LPG: 0,412 kg/TJ; SO₂-Faktor CNG: 0,150 kg/TJ; Kerosin: 19,6 kg/TJ

Quellen: Umweltbundesamt, eigene Annahmen

2.1.4 Energieverbrauch nach Energiebilanz

Eine wichtige Basis zur Bestimmung der verkehrsbedingten Emissionen ist der Energieverbrauch in Deutschland. Dieser wird von der AG Energiebilanzen (AG Energiebilanzen n.d.) statistisch erfasst und den verschiedenen Sektoren zugeordnet. Die Energiebilanz ist die Basis der Emissionsberichterstattung (Strogies / Gniffke 2019) und daher auch für die Berechnung der Emissionen in TREMOD relevant. Basis der Energiebilanz für die Kraftstoffe sind die Mengen, die in einem Jahr in Deutschland abgesetzt wurden.

Die Energiebilanz ist eine wichtige statistisch verfügbare Randgröße zur Überprüfung der mit TREMOD berechneten Ergebnisse, da alle anderen verwendeten Größen wie Fahrleistungen und spezifische Verbräuche mit mehr oder weniger großen Unsicherheiten behaftet sind. Die Absatzzahlen werden daher den mit TREMOD berechneten Ergebnissen gegenübergestellt und die Unterschiede bewertet (siehe Kapitel 2.1.5).

Neben der Energiebilanz werden die Amtlichen Mineralöldaten des BAFA verwendet (BAFA n.d.), da diese zeitnah veröffentlicht werden und Auskunft geben über den Absatz der Biokraftstoffe. Daraus kann der jährlich Anteil von Biodiesel und Bioethanol am Diesel- bzw. Benzinverbrauch abgeleitet werden. Eine sektorale Zuordnung der Kraftstoffe liefert die BAFA-Statistik nicht. Daher werden in der TREMOD-Berechnung folgende Annahmen getroffen:

- ▶ Bei den Ottokraftstoffen wird der jährlich ermittelte Anteil des Bioethanols für alle Sektoren gleich angenommen.
- ▶ Beim Dieselmotorkraftstoff werden die nicht beigemischten Biokraftstoffe (FAME und Pflanzenöl) dem Straßenverkehr zugeordnet. Der jährliche ermittelte Anteil der Beimischung von

Biodiesel wird für alle Sektoren gleich angenommen. Dabei wird vernachlässigt, dass die AG Energiebilanzen seit 2014 keine Biokraftstoffe in der Binnenschifffahrt ausweist.

- Biogas wird seit 2012 in der Energiebilanz des Straßenverkehrs erfasst und wird so in TREMOD übernommen.

Die so ermittelten Absatzzahlen nach Sektoren sind Basis der Emissionsberichterstattung für den Verkehrsbereich. In der folgenden Tabelle 5 sind der Kraftstoffabsatz und der Energieverbrauch im Inland für die Jahre 1990-2018 entsprechend der hier beschriebenen Zuordnung dargestellt.

Tabelle 5: Kraftstoffabsatz in Deutschland nach Energiebilanz 1990-2018

In PJ/a	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018
Straßenverkehr									
Dieselmkraftstoffe									
Diesel konventionell	736	964	1.108	1.079	1.168	1.349	1.393	1.425	1.377
Biodiesel Beimischung	0,0	0,0	0,0	24	76	73	73	76	79
Biodiesel (FAME)	0	2	12	41	11	0,1	0,0	0,0	0,0
Pflanzenöl	0,0	0,0	0,0	7	2,2	0,1	0,1	0,0	0,0
Biokraftstoffe gesamt	0	2	12	72	89	73	73	76	79
Diesel Gesamt	736	966	1.120	1.150	1.257	1.422	1.467	1.501	1.457
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,2%	1,1%	6,2%	7,1%	5,1%	5,0%	5,0%	5,5%
Ottokraftstoffe									
Otto konventionell	1.330	1.300	1.237	992	791	709	709	720	693
Ethanol	0	0	0	7	31	31	31	30	31
Otto Gesamt	1.330	1.300	1.237	999	822	739	740	750	724
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	0,0%	0,7%	3,7%	4,2%	4,2%	4,0%	4,3%
Andere Kraftstoffe									
CNG				3,1	8,8	7,4	5,8	5,2	6,2
Biogas						1,2	1,4	1,6	1,4
LPG		0,1	0,1	2,4	22	19	17	15	14
Schieneverkehr									
Dieselmkraftstoffe									
Diesel konventionell	38	31	25	18	15	13	14	11	11
Biodiesel Beimischung	0,0	0,0	0,0	0,4	0,9	0,7	0,7	0,6	0,6
Diesel gesamt	38	31	25	19	16	14	14	12	12
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	0,0%	2,1%	6,1%	5,1%	5,0%	5,0%	5,5%

In PJ/a	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018
Binnenschifffahrt									
Dieselmotoren									
Diesel konventionell	28	24	12	13	11	13	11	10	9
Biodiesel Beimischung	0,0	0,0	0,0	0,3	0,7	0,7	0,6	0,5	0,5
Diesel gesamt	28	24	12	13	12	14	12	11	10
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	0,0%	2,1%	6,1%	5,1%	5,0%	5,0%	5,5%
Sonstige Verbraucher									
Dieselmotoren									
Diesel konventionell	127	106	96	85	90	102	106	109	102
Biodiesel Beimischung	0,0	0,0	0,0	1,9	5,8	5,5	5,6	5,8	5,9
Diesel gesamt	127	106	96	87	96	108	112	115	107
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	0,0%	2,1%	6,1%	5,1%	5,0%	5,0%	5,5%
Ottomotoren									
Otto konventionell	30	20	17	17	13	13	12	12	11
Ethanol	0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Otto Gesamt	30	20	17	17	13	13	13	12	12
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	0,0%	0,7%	3,7%	4,2%	4,2%	4,0%	4,3%
Gesamt									
Dieselmotoren									
Diesel konventionell	929	1.124	1.242	1.195	1.284	1.478	1.525	1.556	1.499
Biodiesel Beimischung	0,0	0,0	0,0	26	83	80	80	83	87
Biodiesel (FAME)	0	2	12	41	11	0,1	0,0	0,0	0,0
Pflanzenöl	0,0	0,0	0,0	7,4	2,2	0,1	0,1	0,0	0,0
Biokraftstoffe gesamt	0	2	12	74	96	80	80	83	87
Diesel Gesamt	929	1.126	1.254	1.269	1.380	1.558	1.605	1.639	1.586
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,1%	1,0%	5,9%	7,0%	5,1%	5,0%	5,0%	5,5%
Ottomotoren									
Otto konventionell	1.361	1.320	1.254	1.009	804	721	721	731	704
Ethanol	0,0	0,0	0,0	6,9	31	31	31	31	32
Otto Gesamt	1.361	1.320	1.254	1.016	835	753	753	762	736
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	0,0%	0,7%	3,7%	4,2%	4,2%	4,0%	4,3%
Flugverkehr									

In PJ/a	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018
Kerosin (in PJ)	193	233	297	344	362	362	389	425	437
Flugbenzin (in PJ)	2,4	1,1	1,1	0,7	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4

Quellen: AG Energiebilanzen, Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, eigene Berechnungen

2.1.5 Vergleich Kraftstoffabsatz mit dem Inlandsverbrauch

Anders als im stationären Bereich ist im Verkehr der Ort des Verbrauchs nicht identisch mit dem Ort der Energieaufnahme. Außerdem treten zeitliche Differenzen auf, z.B. wenn zum Jahresende aufgrund angekündigter Preissteigerungen die Fahrzeugtanks gefüllt werden. Daher kommt es zu Differenzen zwischen den Absatzzahlen nach Energiebilanz und der im Inland verbrauchten Energie. Der mit TREMOD berechnete Inlandsverbrauch und die Absatzmengen der AG Energiebilanzen sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Vergleich Verbrauch im Inland und Absatz für Benzin und Diesel im Straßenverkehr 1990-2018

	Benzin- verbrauch im Inland (PJ)	Benzinabsatz im Inland (PJ)	Differenz Absatz/ Verbrauch	Diesel- verbrauch im Inland (PJ)	Dieselabsatz im Inland (PJ)	Differenz Absatz/ Verbrauch
1990	1.272	1.330	4,6%	708	736	3,9%
1991	1.277	1.332	4,3%	803	785	-2,2%
1992	1.293	1.344	3,9%	835	854	2,2%
1993	1.305	1.351	3,5%	851	908	6,7%
1994	1.283	1.277	-0,5%	927	932	0,5%
1995	1.284	1.300	1,2%	967	966	-0,1%
1996	1.288	1.300	0,9%	989	967	-2,2%
1997	1.294	1.297	0,3%	1014	983	-3,0%
1998	1.315	1.300	-1,1%	1030	1027	-0,3%
1999	1.316	1.301	-1,2%	1084	1102	1,7%
2000	1.279	1.237	-3,3%	1120	1120	0,0%
2001	1.263	1.199	-5,1%	1166	1114	-4,5%
2002	1.238	1.166	-5,8%	1206	1126	-6,6%
2003	1.189	1.109	-6,7%	1236	1108	-10,3%
2004	1.158	1.074	-7,3%	1300	1150	-11,6%
2005	1.089	999	-8,2%	1312	1150	-12,3%
2006	1.054	944	-10,4%	1367	1212	-11,3%
2007	1.026	905	-11,8%	1419	1217	-14,2%
2008	988	870	-11,9%	1415	1212	-14,4%
2009	980	853	-13,0%	1385	1204	-13,0%

	Benzin- verbrauch im Inland (PJ)	Benzinabsatz im Inland (PJ)	Differenz Absatz/ Verbrauch	Diesel- verbrauch im Inland (PJ)	Dieselabsatz im Inland (PJ)	Differenz Absatz/ Verbrauch
2010	958	822	-14,2%	1423	1257	-11,7%
2011	946	820	-13,3%	1455	1280	-12,0%
2012	916	775	-15,4%	1462	1309	-10,4%
2013	891	773	-13,3%	1494	1359	-9,0%
2014	879	777	-11,6%	1534	1376	-10,3%
2015	839	739	-11,9%	1574	1422	-9,6%
2016	827	740	-10,6%	1612	1467	-9,0%
2017	824	750	-9,0%	1637	1501	-8,3%
2018	823	724	-12,1%	1644	1457	-11,4%

Anmerkung: Ottokraftstoffe inkl. Ethanol, Dieselmotoren für Straßenverkehr inkl. Biodiesel (rein und Beimischung) und Pflanzenöl

Quelle: TREMOD 6.03 vom 31.01.2020, AG Energiebilanzen, BAFA

Der Vergleich zeigt, dass der Inlandsverbrauch aller Kraftstoffe bis zum Jahr 1999 nahe den Absatzzahlen liegt, aber danach höher ist als der Kraftstoffabsatz. Diese Entwicklung fällt zusammen mit der Einführung der Ökosteuer, mit der ab dem Jahr 1999 der Kraftstoffpreis fünf Jahre lang jährlich erhöht wurde. Eine wichtige Konsequenz ist, dass die Emissionsentwicklung des Verkehrs im nationalen Inventarbericht nach 2000 niedriger ausfällt als nach der Inlandsbilanzbilanzierung in TREMOD (siehe auch Kapitel 4.4).

Da für die Emissionsberichterstattung das Energie- und Treibhausgasinventar nach den Absatzzahlen der Energiebilanz bestimmt wird, müssen die Inlandsergebnisse von TREMOD an die Absatzzahlen der Energiebilanz angepasst werden (siehe auch Kapitel 4.5). Dazu werden Anpassungsfaktoren wie folgt ermittelt:

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

- Die Beimischung von Biokraftstoffen wird in allen Sektoren gleich angenommen. Der Verbrauch an reinen Biokraftstoffen wird mangels genauer Informationen dem Straßenverkehr zugeordnet.

Mit diesen Annahmen ergeben sich die in der folgenden Tabelle dargestellten Anpassungsfaktoren, mit denen der mit TREMOD berechnete Verbrauch und die zugehörigen Emissionen im Inland in die kraftstoffabsatz-bezogenen Ergebnisse nach Energiebilanz umgerechnet wird.

Tabelle 7: Anpassungsfaktoren Kraftstoffabsatz Energiebilanz / Inlandsverbrauch TREMOD 1990-2018

	Straße, Kfz<=3,5t Otto+Diesel	Straße, Kfz>3,5t	Diesel Bahn	Diesel Binnenschiff
1990	1,05	1,03		
1991	1,04	0,94		
1992	1,04	1,01		
1993	1,04	1,09		
1994	1,00	1,01	1,05	1,14
1995	1,01	0,99	1,04	0,88
1996	1,01	0,96	1,03	0,85
1997	1,00	0,95	1,03	0,67
1998	0,99	1,00	1,05	0,60
1999	0,99	1,03	1,06	0,51
2000	0,97	1,02	1,08	0,45
2001	0,95	0,96	1,03	0,45
2002	0,94	0,93	1,13	0,40
2003	0,93	0,87	1,12	0,47
2004	0,93	0,85	1,06	0,49
2005	0,92	0,84	0,95	0,55
2006	0,90	0,88	0,96	0,49
2007	0,88	0,83	0,97	0,50
2008	0,88	0,83	0,92	0,47
2009	0,87	0,87	0,88	0,61
2010	0,86	0,91	0,88	0,56
2011	0,87	0,89	0,90	0,63
2012	0,85	0,95	0,83	0,61
2013	0,87	0,96	0,83	0,62

	Straße, Kfz<=3,5t Otto+Diesel	Straße, Kfz>3,5t	Diesel	Bahn	Diesel Binnenschiff
2014	0,88	0,91	0,84		0,65
2015	0,88	0,93	0,90		0,72
2016	0,89	0,93	0,93		0,64
2017	0,91	0,93	0,75		0,56
2018	0,88	0,89	0,73		0,59

Quelle: TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

Plausibilität der Unterschiede Absatz - Verbrauch

Der Unterschied zwischen Inlandsverbrauch und Kraftstoffabsatz im Zeitverlauf ist z.T. starken Schwankungen unterworfen. Diese lassen sich bisher nur teilweise erklären. Ein wesentliches Problem ist hierbei, dass es bisher keine Dokumentation zur Energiebilanz gibt, die das Verfahren der Ermittlung der Absatzzahlen und Aufteilung auf die Sektoren erklärt. Auf der anderen Seite ist der mit TREMOD berechnete Inlandsverbrauch auch mit Unsicherheiten verbunden, da die zugrunde liegenden Kennzahlen (Fahrleistungen, Flottenzusammensetzung, spezifischer Energieverbrauch) keine exakten Größen sind sondern ihrerseits zum Teil auf vereinfachten Hochrechnungen und Modellierungen beruhen.

Folgende Zusammenhänge können beobachtet werden:

- ▶ Beim Otto-Kraftstoff besteht die beste Korrelation zwischen Inlandsverbrauch und Absatz. Bis 1999 liegen der Inlandsverbrauch und Absatz etwas auf dem gleichen Niveau, ab dem Jahr 2000 steigt der Inlandsverbrauch gegenüber dem Absatz an. Ab etwa 2007 bleibt der Abstand mehr oder weniger gleich. Grund dafür könnte die ab 1999 die zunehmende Preisdifferenz zwischen Deutschland und den Nachbarländern sein, die höhere graue Kraftstoffimporte auslöst.
- ▶ Beim Dieselmotorkraftstoff lag der Inlandsverbrauch bis zum Jahr 2000 sehr nahe am Absatz, wobei die jährlichen Unterschiede stärker schwanken als beim Otto-Kraftstoff. Von 2001 bis 2008 stieg der Dieselmotorkraftstoffabsatz deutlich langsamer als der Inlandsverbrauch. Nach 2009 verringerte sich der Unterschied zwischen Absatz und Verbrauch etwas und bleibt dann bis 2018 auf einem ähnlichen Niveau. Der Verlauf ist also ähnlich wie beim Otto-Kraftstoff, ebenso die Gründe.
- ▶ Bei der Bahn liegen die Absatzzahlen der DB zusammen mit den Abschätzungen für den übrigen Bahnverkehr für die aktuellen Bezugsjahre über den Absatzzahlen. 2017 und 2018 sind die Abweichungen besonders groß. Hier liegt der Absatz rund 25 % unter den berechneten Werten.
- ▶ Bei der Binnenschifffahrt kommt es seit 1994 zu einer zunehmenden Differenz zwischen dem mit TREMOD berechneten Inlandsverbrauch und der Energiebilanz. Wesentliche Gründe hierfür könnten die zunehmende Betankung im Ausland und statistische Umstellungen sein.

In der Studie (Althaus et al. 2019) wurde festgestellt, dass die mit dem TREMOD-Modell berechneten Kraftstoffverbräuche und die Differenzen zu den Absatzzahlen plausibel sind. Das DLR kommt in «Verkehr in Zahlen» für das Jahr 2017 für den Inländerverbrauch von Benzin, der sich kaum vom Verbrauch im Inland unterscheidet (die Pkw-Inlands- und Inländerfahrleistung sind nahezu identisch), auf ähnliche Unterschiede und vermutet als Ursache nahezu ausschließlich die grauen Importe.

Beim Dieselmotorkraftstoff sind Inländerverbrauch («Verkehr in Zahlen») und Inlandsverbrauch (TREMOD) wegen des Fahrleistungssaldos im Güterverkehr (mehr Güterfahrleistung durch Ausländer im Inland als von Inländern im Ausland) nicht unmittelbar vergleichbar. So berechnet das DLR für die Inländerfahrleistung 2017 einen Gesamtverbrauch, der nahezu mit den Absatzzahlen der Energiebilanz übereinstimmt, während TREMOD mit einer höheren Fahrleistung im Güterverkehr durch die Ausländer im Inland einen Mehrverbrauch des Inlandsverkehrs von rund 9 % berechnet (siehe Tabelle 6). Angesichts eines Fahrleistungsanteils der ausländischen Lkw-, Last- und Sattelzüge von 20 % auf dem Territorium Deutschlands (Bäumer et al. 2016) ist diese Größenordnung plausibel, ebenso wie die Vermutung, dass ein größerer Teil dieser Differenz ebenfalls den grauen Importen zuzurechnen ist.

Hinzu kommen weitere Unsicherheiten, etwa bei der Aufteilung der Kraftstoffe auf die einzelnen Sektoren, oder Änderungen in der Zuordnung der Kraftstoffe in der Mineralölabsatzstatistik 2018 des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle ((BAFA n.d.)), die das DLR in der Ende 2019 erscheinenden Ausgabe von «Verkehr in Zahlen» 2019/2020 berücksichtigt hat.

Im Rahmen der Studie (Althaus et al. 2019) war es nicht mehr möglich, die erst zu Projektende vorliegenden Berechnungsergebnisse aus TREMOD, die im Laufe des Jahres 2019 publizierten geänderten Daten der Mineralölstatistik (BAFA) und die Arbeiten zur Berücksichtigung der Energiestatistikanpassung in «Verkehr in Zahlen» 2019/2020 zu berücksichtigen und abzugleichen. Ein solcher Abgleich sollte jedoch 2020 nachgeholt werden und wäre eine gute Grundlage für die Fortentwicklung der Methode zur Bestimmung der grauen Im- und Exporte.

2.1.6 Verkehrsleistungen

Für die Aktualisierung der Verkehrsmengen bis 2018 lagen mit Stand Juli 2019 folgende Daten vor, die für die Aktualisierung der Fahr- und Verkehrsleistungen bis 2018 verwendet wurden:

- ▶ Verkehr in Zahlen 2018/2019 (Radke 2018):
Fahr- und Verkehrsleistungsdaten bis 2017
- ▶ Mittelfristprognose Winter 2018/19 (Intraplan 2019):
Verkehrsleistungsentwicklung MIV von 2017 bis 2018
Verkehrsleistungsentwicklung GV Straße von 2017 bis 2018
Fahrleistungsentwicklung der Pkw von 2017 bis 2018
- ▶ Beförderungsmenge und Beförderungsleistung des Güterverkehrs bis 2018 (DESTATIS 2019c)
- ▶ Eisenbahnverkehr, Dezember 2017, DESTATIS, Fachserie 8 Reihe 2 (DESTATIS 2018):
Verkehrsleistungen Eisenbahn Personennah-, fern- und Güterverkehr 2017

- ▶ DB Umwelt: Kennzahlen zum Eisenbahnverkehr der DB 2018 (DB Umwelt 2019)
Verkehrsleistungen, Auslastung nach Traktionsarten der DB AG
- ▶ Personenverkehr mit Bussen und Bahnen, 4. Vierteljahr 2017 (DESTATIS, Fachserie 8, Reihe 3.1): Verkehrsleistungen der Busse , Straßen-, Stadt und U-Bahnen 2017 sowie der Eisenbahnen 2017 (Statistisches Bundesamt 2019)
- ▶ Sonderabfrage DESTATIS zur Binnenschifffahrt 2018
- ▶ Sonderabfrage DESTATIS zum Flugverkehr 2018

Dabei wurden einzelne Werte z.T. rückwirkend leicht korrigiert, so dass im Detail Unterschiede zu TREMOD 5.8 im unteren Prozentbereich auftreten, z.B. ab 2015 höhere Verkehrsleistungen im Straßengüterverkehr und geringere Verkehrsleistungen im MIV. Die folgende Tabelle fasst die Verkehrsleistungsentwicklung von 2010-2018 für den Straßen-, Schienen-, Binnenschiffs- und Flugverkehr zusammen.

Tabelle 8: Verkehrsleistungsentwicklung 2010-2018

	2010	2015	2016	2017	2018	2010-2018	2017-2018
Personenverkehr (Mrd. Pkm)	1.092,7	1.133,7	1.145,6	1.154,2	1.153,9	6%	0,0%
davon:							
Straße	992,5	1.026,9	1.034,4	1.041,3	1.038,4	5%	-0,3%
MIV	902,9	935,7	942,7	950,3	947,4	5%	-0,3%
Bus	89,6	91,2	91,7	91,0	91,0	2%	0,0%
Schiene	100,2	106,8	111,1	112,9	115,5	15%	2,2%
PNV DB	41,4	42,6	40,8	41,9	41,9	1%	0,0%
PNV NE	6,6	10,3	13,6	13,0	13,3	101%	1,7%
PFV	36,0	36,8	39,3	40,3	42,6	18%	5,7%
SSU-Bahnen	16,2	17,1	17,4	17,7	17,7	10%	0,0%
Güterverkehr (Mrd. tkm)	610,7	645,3	662,0	676,4	687,5	13%	1,6%
davon:							
Straße	440,6	465,6	479,4	491,0	506,9	15%	3,2%
Schiene	107,9	124,3	128,3	129,9	133,7	24%	2,9%
Schiene DB	80,4	71,0	68,6	67,6	64,2	-20%	-5,0%
Schiene NE	27,5	53,3	59,7	62,3	69,5	153%	11,5%
Binnenschiff	62,3	55,3	54,3	55,5	46,9	-25%	-15,5%
Flugverkehr							
Personenverkehr (Mrd. Pkm)	194,3	221,4	226,8	240,2	249,1	28%	3,7%

	2010	2015	2016	2017	2018	2010-2018	2017-2018
davon:							
National	10,8	10,3	10,4	10,3	10,3	-5%	-0,1%
International abgehend	183,5	211,1	216,5	229,9	238,8	30%	3,8%
Güterverkehr (Mrd. tkm) davon:	10,8	11,4	11,8	12,5	12,7	18%	1,8%
National	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	23%	1,5%
International abgehend	10,7	11,4	11,7	12,4	12,7	18%	1,8%

Quellen: Verschiedene Statistiken (siehe Text), Eigene Annahmen

2.2 Straßenverkehr

2.2.1 Fahrzeugbestand nach Antriebsart

Der Berücksichtigung verschiedener Kraftstoffarten pro Fahrzeugkategorie unterscheidet sich in TREMOD je nach Bezugsjahr. Eine Übersicht zeigt Tabelle 9.

Insbesondere nahm die Bedeutung von alternativen Antrieben in letzten Jahren zu. Daher wird beispielsweise LPG ab dem Jahr 2001, CNG und Hybride ab 2006 in TREMOD berücksichtigt, während aktuell insbesondere im Bereich der Elektromobilität Zuwächse stattfinden. In Anlehnung an die nationale Energiebilanz wurde die Zuordnung der Antriebsarten rückwirkend ab 2012 angepasst. Für alle Fahrzeuge, mit Ausnahme von Sattelzügen und Reisebussen, wurden rein batterieelektrische Elektroantriebe (BEV) aufgenommen. Weiterhin werden für die PKW Plug-In Hybride (PHEV), für die SNF Erdgasantriebe und für Linienbusse Hybride abgebildet. Eine Übersicht zur Entwicklung des Fahrzeugbestands in TREMOD nach Antriebsarten wird in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Tabelle 9: Berücksichtigte Antriebsarten pro Fahrzeugkategorie bis zum Bezugsjahr 2018

Fahrzeugkategorie	Otto	Diesel	Hybrid	CNG	LPG	BEV	PHEV (D/B)
KKR	≥1960					≥2012	
KR	≥1960					≥2012	
Pkw	≥1960	≥1960		≥2006	≥2001	≥2012	≥2012
LNF	≥1960	≥1960		≥2006	≥2006	≥2012	
LKW		≥1960		≥2012		≥2012	
SZ/LZ		≥1960		≥2012			
Linienbusse		≥ 1960	≥2012	≥2006		≥2012	
Reisebusse		≥ 1960				≥2012	

Anmerkung: Weitere alternative Antriebe des KBA-Fahrzeugregisters und solche welche in früheren Jahren noch nicht in TREMOD berücksichtigt werden, werden entweder zu Otto- oder Dieselfahrzeugen aggregiert.

Bei den Pkw nahm der Anteil der Dieselfahrzeuge zwischen 2000 und 2018 von 14% auf 33% zu. Die alternativen Antriebe (CNG, LPG, BEV und PHEV) machten 2018 etwa 1,3 % des PKW-Bestands aus.

Tabelle 10: Entwicklung des Pkw-Bestands nach Antriebsart 2000-2018

Jahr	Anzahl (Mio.)	Otto	Diesel	LPG	CNG	BEV	PHEV-B/D
2000	42,8	86%	14%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2005	45,7	79%	21%	0,07%	0,00%	0,00%	0,00%
2006	46,3	77%	23%	0,14%	0,08%	0,00%	0,00%
2007	46,5	76%	24%	0,21%	0,10%	0,00%	0,00%
2008	41,2	75%	25%	0,54%	0,13%	0,00%	0,00%
2009	41,5	74%	25%	0,78%	0,15%	0,00%	0,00%
2010	42,0	73%	26%	0,91%	0,17%	0,00%	0,00%
2011	42,6	72%	27%	1,00%	0,17%	0,00%	0,00%
2012	43,2	70%	28%	1,07%	0,18%	0,01%	0,00%
2013	43,6	69%	30%	1,11%	0,18%	0,02%	0,00%
2014	44,1	68%	31%	1,10%	0,18%	0,04%	0,01%
2015	44,7	67%	32%	1,06%	0,18%	0,05%	0,02%
2016	45,4	66%	33%	0,99%	0,17%	0,07%	0,03%
2017	46,1	66%	33%	0,92%	0,17%	0,10%	0,07%
2018	46,8	66%	33%	0,85%	0,17%	0,15%	0,12%

Quelle: KBA, eigene Berechnungen. Anmerkung: Bestand zur Mitte des Jahres

Bei den leichten Nutzfahrzeugen nahm seit 2000 der Bestand um über 47 % zu. Der Dieselanteil nahm ebenfalls zu und lag im Jahr 2018 bei 93 %. Hierbei waren CNG mit 0,5 % und BEV mit 0,6 % die häufigsten alternativen Antriebe.

Tabelle 11: Entwicklung des LNF-Bestands von 2000-2018 nach Antriebsart

Jahr	Anzahl (in 1000)	Otto	Diesel	CNG	BEV
2000	1.734	17%	83%	0,0%	0,0%
2005	1.896	11%	89%	0,0%	0,0%
2006	1.927	10%	90%	0,3%	0,0%
2007	1.979	9%	90%	0,5%	0,0%
2008	1.784	8%	91%	0,6%	0,0%

Jahr	Anzahl (in 1000)	Otto	Diesel	CNG	BEV
2009	1.826	8%	91%	0,7%	0,0%
2010	1.879	8%	92%	0,8%	0,0%
2011	1.949	7%	92%	0,8%	0,0%
2012	2.017	7%	92%	0,8%	0,1%
2013	2.073	6%	93%	0,8%	0,1%
2014	2.138	6%	93%	0,7%	0,1%
2015	2.226	6%	93%	0,7%	0,2%
2016	2.330	6%	94%	0,6%	0,2%
2017	2.442	5%	94%	0,6%	0,4%
2018	2.558	6%	93%	0,5%	0,6%

Quelle: KBA, eigene Annahmen. Anmerkung: Bestand zur Mitte des Jahres

Die schweren Nutzfahrzeuge für den Gütertransport insgesamt sind in der Bestandsentwicklung bis 2010 rückläufig, vor allem bedingt durch eine Abnahme der Solo-Lkw. Fast alle SNF werden mit Diesel angetrieben. Bei den ab 2012 berücksichtigten alternativen Antrieben zeigte sich ein leichter Rückgang bei den Erdgasfahrzeugen.

Tabelle 12: Entwicklung des SNF-Bestands nach Antrieben 2000-2018

Jahr	Anzahl (in 1000)	Diesel	CNG/LNG	BEV
2000	955	100%		
2005	863	100%		
2006	858	100%		
2007	861	100%		
2008	729	100%		
2009	714	100%		
2010	709	100%		
2011	717	100%		
2012	720	99,8%	0,14%	0,05%
2013	715	99,8%	0,14%	0,05%
2014	714	99,8%	0,13%	0,05%
2015	716	99,8%	0,11%	0,05%
2016	725	99,9%	0,09%	0,05%
2017	736	99,9%	0,09%	0,05%
2018	747	99,8%	0,09%	0,07%

Quelle: KBA, eigene Annahmen. Anmerkung: Bestand zur Mitte des Jahres

Schließlich sind in TREMOD die Bestände der Kleinkrafträder, Krafträder, Busse und übrige Kfz enthalten. Zur Abschätzung des Stromverbrauchs werden ab dem Jahr 2012 auch E-Bikes bzw. Pedelecs (Fahrräder mit elektrischer Trittmunterstützung) berücksichtigt.

Eine Unterscheidung nach Linien- und Reisebussen wurde bis 2011 aufgrund des in den KBA-Tabellen enthaltenen Kriteriums „Anzahl Stehplätze >0 ist Linienbus“ bzw. „=0 ist Reisebus“) vorgenommen. Problematisch bei der Anwendung dieses Kriterium ist, dass die resultierende Anzahl an Linienbussen sehr gering ist und diese nicht mit anderen Angaben übereinstimmt. Somit wurde die Anzahl der Linienbusse anhand der VDV-Statistik und unter der Annahme abgeleitet, dass dort ca. 90 % der in Deutschland zugelassenen Linienbusse erfasst werden. Dies bedeutet, dass 1/3 aller Busse ohne Stehplätze zusätzlich den Linienbussen zugeordnet wurden.

Ab dem Jahr 2012 wurde der Busbestand anhand weiterer Merkmale neu aufgeteilt. Hinzu kommt die Kategorie der Fernlinienbusse, die von der Kategorie „Sonstige Reisebusse“ unterschieden werden. Eine weiter zurückreichende aktualisierte Aufteilung konnte mit den vorliegenden Informationen nicht vorgenommen werden. Details zur Ableitung der Busbestände ab 2012 sind im Anhang A dargestellt.

Sowohl die Gesamtanzahl der in Deutschland zugelassenen Busse als auch deren Aufteilung auf die verschiedenen Größenklassen wurde gemäß der KBA-Statistik übernommen. Legt man diese Aufteilung zugrunde, ergeben sich die in Tabelle 13 dargestellten Entwicklungen.

Der Bestand an Reisebussen im Gelegenheits- und sonstigem Busverkehr hat zwischen 2000 und 2011 abgenommen, nehmen aber in der neuen Abgrenzung bis 2018 wieder zu. Bei den Fernlinienbussen kam es ab 2012 zunächst zu einem Anstieg, seit 2014 ist ein leichter Rückgang der Bestände zu beobachten. Reise- und Fernlinienbusse werden bisher fast ausschließlich mit Dieselmotor angetrieben.

Bei den Linienbussen nahm der Bestand in derselben Zeitspanne zu. Diese werden ebenfalls überwiegend mit Dieselmotor angetrieben. Alternative Antriebe waren hierbei vor allem CNG mit einen Anteil von 3% ab 2006, der jedoch bis 2018 wieder auf 2,2 % zurückging. Tendenziell gestiegen in den letzten Jahren ist hingegen der Anteil der Hybrid- und Elektro-Busse.

Tabelle 13: Entwicklung des Reise- und Linienbus-Bestands von 2000-2018 nach Antriebsart

Jahr	Fernlinienbusse	Sonstige Reisebusse	Linienbus Gesamt	davon Diesel	davon CNG	davon Hybrid	davon BEV
2000	0	40.417	45.157	100%			
2005	0	39.011	45.600	100%			
2006	0	37.638	46.088	97%	2,9%		
2007	0	35.982	47.444	97%	3,1%		
2008	0	30.561	44.608	97%	3,3%		
2009	0	30.091	45.761	97%	3,3%		
2010	0	29.842	46.606	97%	3,3%		
2011	0	28.135	48.091	97%	3,1%		
2012	857	24.110	51.039	96%	3,5%	0,4%	0,0%
2013	942	24.577	50.889	96%	3,3%	0,5%	0,1%

Jahr	Fernlinienbusse	Sonstige Reisebusse	Linienbus Gesamt	davon Diesel	davon CNG	davon Hybrid	davon BEV
2014	950	24.787	51.411	96%	3,1%	0,5%	0,1%
2015	887	24.897	52.138	96%	2,9%	0,6%	0,1%
2016	858	25.102	52.687	96%	2,7%	0,7%	0,1%
2017	827	25.249	53.118	97%	2,4%	0,8%	0,2%
2018	798	25.471	53.709	97%	2,2%	1,0%	0,3%

Anmerkung: Ab 2012 geänderte Aufteilung

Quelle: KBA, eigene Annahmen

Der Bestand der vom KBA registrierten Krafträder hat zwischen 2000 und 2018 zugenommen. Dabei nahm der Anteil der 2-Takter kontinuierlich ab und lag 2018 bei 5 %, während ca. 0,2 % der Krafträder batteriebetrieben waren. Die Zahl der mit Versicherungskennzeichen erfassten Kleinkrafträder (u.a. Mopeds und Roller) blieb in den letzten Jahren relativ konstant. Deren Antriebsart wird hierbei nicht statisch erfasst, daher wird für TREMOD angenommen, dass es sich bisher weitgehend um 2-Takter handelte. Für den Anteil der Elektro-Roller wurde in Anlehnung an (elektroroller-forum.de, 2012) näherungsweise angenommen, dass 2011 ca. 4.000 solcher Fahrzeuge auf dem Markt waren und deren Bestand jährlich um 2.000 Fahrzeuge stieg. Die batterieelektrischen Pedelecs haben in den letzten Jahren stark zugenommen, ihr Bestand wurde in 2018 auf 3,65 Mio. Fahrzeuge geschätzt.

Tabelle 14: Entwicklung des KR-, KKR- und Pedelec-Bestands nach Antrieben 2000-2018

Jahr	Anzahl KR (in 1000)	davon Otto 2-T	davon Otto 4-T	davon BEV	Anzahl KKR (in 1000)	davon Otto 2-T	davon BEV	Anzahl Pedelecs (in 1000)
2000	3.316	9%	91%		1.743	100%		
2005	3.854	8%	92%		1.786	100%		
2006	3.936	7%	93%		1.819	100%		
2007	4.003	7%	93%		1.930	100%		
2008	3.612	7%	93%		1.984	100%		
2009	3.711	7%	93%		2.194	100%		
2010	3.795	7%	93%		2.104	100%		
2011	3.868	7%	93%		2.043	100%		
2012	3.946	6%	94%	0,1%	1.991	99,4%	0,3%	1.000
2013	4.019	6%	94%	0,1%	1.993	99,2%	0,4%	1.400
2014	4.100	6%	94%	0,1%	1.959	99,0%	0,5%	1.800
2015	4.187	6%	94%	0,2%	2.036	98,8%	0,6%	2.200
2016	4.271	5%	94%	0,2%	2.020	98,6%	0,7%	2.600
2017	4.344	5%	94%	0,2%	1.986	98,4%	0,8%	3.000
2018	4.406	5%	95%	0,2%	2.028	98,2%	0,9%	3.650

Quelle: KBA, ZIV/Pedelection. Anmerkung: Bestand zur Mitte des Jahres

2.2.2 Fahrleistungen nach Fahrzeugkategorien

Es wurde das aktualisierte Fahrleistungsgerüst zugrunde gelegt. Dieses berücksichtigt die neuen Ergebnisse der Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al. 2016) und anderer aktueller Fahrleistungsdaten, z.B. (KBA 2018). Die Ableitung der Fahrleistung ist detailliert im Anhang B dargestellt. Die Unterschiede zwischen den bisherigen und den aktuellen Werten sind für das Jahr 2014 in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 15: Aktualisierte Fahrleistungsdaten in TREMOD für Deutschland 2014

	FL gesamt (Mrd. km)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	sonstige
Bisher	742,9	623,6	16,8	3,7	39,3	55,8	3,7
Neu	743,1	622,2	14,2	4,2	42,5	58,7	2,9

Die Fahrleistungen des Straßenverkehrs wurden zusammen mit den Verkehrsleistungen bis 2018 fortgeschrieben (siehe Kapitel 2.1.6). Die Inlandsfahrleistungen in Deutschland werden dominiert von der Pkw-Fahrleistung (Anteil 2018: 83 %). Diese haben von 1990 bis 2018 um 31 % zugenommen. Im gleichen Zeitraum stiegen die Fahrleistungen der schweren Nutzfahrzeuge um 77 % und, mit Abstand am meisten, die der leichten Nutzfahrzeuge (+260 %).

Tabelle 16: Fahrleistungsentwicklung in Deutschland nach Fahrzeugkategorien 1990-2018

Jahr	FL gesamt (Mrd. km)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	563,1	488,6	15,7	4,2	14,3	35,4	5,0
1991	578,0	496,4	14,1	4,1	15,7	42,5	5,3
1992	592,6	510,0	12,8	4,0	17,1	43,2	5,6
1993	605,1	522,0	11,6	3,9	19,0	42,4	6,2
1994	612,6	524,1	11,3	4,0	21,2	45,3	6,8
1995	625,0	530,9	11,9	3,9	23,3	48,0	6,9
1996	633,4	535,2	12,6	3,9	24,8	49,8	7,1
1997	640,3	537,7	13,2	3,9	26,2	52,1	7,2
1998	653,3	547,1	13,7	3,9	27,8	53,5	7,3
1999	670,4	558,9	14,6	4,0	29,8	55,8	7,4
2000	674,3	560,3	14,8	4,0	31,5	56,4	7,3
2001	687,3	571,3	14,7	4,0	33,5	56,2	7,5
2002	697,1	579,5	15,1	4,0	34,7	56,2	7,7
2003	692,5	574,5	14,9	4,0	35,2	56,2	7,6
2004	705,6	587,0	15,1	4,2	35,5	56,1	7,7

Jahr	FL gesamt (Mrd. km)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2005	692,3	574,8	15,4	4,1	35,9	54,4	7,8
2006	697,0	580,5	15,3	4,0	36,7	57,3	3,2
2007	704,1	584,1	15,6	4,0	37,8	59,5	3,1
2008	701,0	581,1	15,5	3,9	38,3	59,4	2,9
2009	707,6	591,4	15,7	4,0	38,8	54,9	2,9
2010	713,6	595,4	15,2	4,0	39,2	56,9	2,8
2011	724,9	605,1	14,8	4,0	39,7	58,5	2,8
2012	725,6	606,4	14,4	4,0	40,2	57,8	2,8
2013	731,6	611,4	14,2	4,1	40,7	58,4	2,8
2014	743,1	622,2	14,2	4,2	42,5	58,7	2,9
2015	755,3	629,5	14,5	4,2	44,7	59,6	2,7
2016	765,6	636,7	14,5	4,3	46,8	60,5	2,8
2017	774,2	642,3	14,5	4,2	49,0	61,6	2,7
2018	777,7	642,3	14,7	4,2	51,3	62,5	2,8

Quelle: TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

2.2.3 Spezifischer Energieverbrauch und Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs werden aus dem HBEFA 4.1 übernommen. Hierbei wird unterschieden nach

- ▶ Emissionen im warmen Betriebszustand
- ▶ Zusätzliche Emissionen durch Kaltstart
- ▶ Kohlenwasserstoffemissionen durch Verdunstung während des Fahrbetriebs
- ▶ Kohlenwasserstoffemissionen durch Verdunstung beim Warmabstellen
- ▶ Kohlenwasserstoffemissionen durch Verdunstung des Tanksystems aufgrund von Temperaturdifferenzen.

HBEFA 4.1 ist ein umfassendes Update und enthält mehrere neue Funktionen und Aktualisierungen. Sie sind in den folgenden Abschnitten kurz zusammengefasst. Weitere Details sind dem Bericht (Notter et al. 2019) zu entnehmen.

2.2.3.1 Alternative Antriebsstränge

Alternative Antriebsstränge sind ein Schwerpunkt des HBEFA 4.1. Elektrofahrzeuge (BEV, PHEV) werden neu eingeführt. Für CNG/LNG-Fahrzeuge sind Emissionsfaktoren auf der Grundlage von Messungen und modelliert für die Verkehrssituationen im PHEM-Modell verfügbar (in früheren Versionen waren Emissionsfaktoren verfügbar, die jedoch nur aus anderen Teilsegmenten abgeleitet wurden).

2.2.3.2 Aktualisierungen der warmen Emissionsfaktoren

Alle warmen Emissionsfaktoren basieren auf

- ▶ derzeit verfügbaren Messungen. Durch PEMS und Dieselgate sind seit der letzten HBEFA-Version große Mengen an neuen Messdaten verfügbar. Wie in früheren HBEFA-Versionen wurde die Messdatenbank, insbesondere die neueren Emissionsnormen, verbessert.
- ▶ der neuen Version des PHEM (Pkw- und Lkw-Emissionsmodells) der Technischen Universität Graz, das die warmen Emissionsfaktoren über den Fahrzyklus modelliert. Es verfügt über ein neues Schaltungsmodell und Verbesserungen in der Simulation von SCR-Katalysatoren, wie beispielsweise ein neues NH₃-Speichermodul (Matzer et al. 2019).

Als wesentliche Änderungen der Modellierung der warmen Emissionsfaktoren in PHEM werden von der TU Graz die folgenden Aktivitäten genannt (Matzer et al. 2019):

- ▶ Erweiterte Testdaten im Vergleich zur vorherigen Version sind enthalten für
 - EURO 6a,b Pkw
 - EURO 5 und EURO 6a,b LNF
 - EURO VI-SNF und Busse
- ▶ Emissionsfaktoren für EURO 6c sowie EURO 6d-Temp Passagier basieren nun auf gemessenen Fahrzeugen (in HBEFA 3.3 nur Annahmen zur Technologie)
- ▶ Die Emissionsfaktoren für motorisierte Zweiräder basieren erstmals auf Simulationen mit dem Modell PHEM
- ▶ Die Fahrzeugdaten für die Emissionssimulation (Rollwiderstand, Luftwiderstand, Beladung,...) wurden mit realen Kraftstoffverbrauchsdaten kalibriert, um die realen Fahrbedingungen für alle Fahrzeugtypen besser zu erfüllen.
- ▶ Mehrere Erweiterungen im Modell PHEM wurden vorgenommen, um die Genauigkeit zu erhöhen und die Verwendung von PEMS-Daten für die Erstellung der Motor-Emissionskarten zu ermöglichen.
- ▶ Die NO_x-Korrekturfunktionen zur Kompensation von Einflüssen der Umgebungstemperatur wurden mit einer breiteren Datenbasis aus Remote Sensing Messungen in Großbritannien aktualisiert.
- ▶ Verschlechterungseffekte durch Fahrzeugalter und Fahrleistung auf die Emissionsfaktoren wurden mit einer breiten Datenbasis aus Remote Sensing Messungen aktualisiert.
- ▶ Zusätzliche Emissionen/Verbräuche durch Klimaanlage (AC) werden nun standardmäßig in alle Emissionsfaktoren einbezogen. Der Anteil der Fahrzeuge mit Klimaanlage entspricht dem europäischen Durchschnitt nach Teilstrecken; der Verbrauch wurde auf der Grundlage realer Kraftstoffverbrauchsdaten kalibriert (siehe Anhang C).

2.2.3.3 Neue Verkehrssituationen und Fahrzyklen

Mehrere zusätzliche Verkehrssituationen wurden eingeführt, nämlich ein fünftes „Level of Service“ („Heavy stop+go“, d.h. Stau mit Durchschnittsgeschwindigkeiten von 5-10 km/h) und Geschwindigkeitsbeschränkungen von 30 km/h auf städtischen Hauptstraßen. In HBEFA 4.1 gibt es 365 differenzierte Verkehrssituationen (gegenüber 276 bis HBEFA 3.3).

Darüber hinaus wurden alle Fahrzyklen für Verkehrssituationen überarbeitet (siehe Bericht von Steven und Ericsson auf <http://www.hbefa.net>). Im Durchschnitt haben die neuen Zyklen tendenziell eine niedrigere Durchschnittsgeschwindigkeit, aber eine höhere Dynamik als die alten, was tendenziell zu höheren Emissionsfaktoren führt.

2.2.3.4 Anpassung der Fahrverhaltensdaten

Die Fahrleistungsanteile nach Verkehrssituationen für Deutschland wurden anhand der nachfolgend näher beschriebenen Datenquellen aktualisiert und an das modifizierte Schema des HBEFA 4.1 angepasst.

Bisher bezogen sich die in TREMOD genutzten Anteile auf eine Untersuchung aus dem Jahr 1996 mit Bezugsjahr 1993 (Heusch-Boesefeldt 1996). Eine umfassende Analyse dieser Art mit neuerem Datum liegt nicht vor. Es konnten jedoch einige neue Erkenntnisse berücksichtigt werden, um die bisherigen Anteile zu aktualisieren. Folgende Anpassungen wurden vorgenommen:

- Berücksichtigung aktueller Streckenlängen nach Tempolimitklassen auf Autobahnen nach (Kollmus et al. 2017); daraus ergeben sich folgende Änderungen:
 - Gegenüber 1993 leichte Abnahme der Strecken mit R 130
 - Zunahme der Strecken mit variablen Tempolimits
 - Insgesamt jedoch nur geringe Änderung der Streckenanteile
- Einführung der Verkehrssituation RUR/MW/>130 (bisher: RUR/MW/130 als Maximum analog Verkehrssituationsschema in HBEFA 2.1)
- Berücksichtigung der Fahrleistungsanteile auf Bundes-, Landes-, Kreis- und Sonstigen Straßen (außerorts und innerorts) nach der Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al. 2016)
- Erhöhung des Stop+Go-Anteils innerorts auf das schweizer Niveau (5%)
- Unterteilung des Level of Service (LOS) Stop+Go in die beiden LOS Stop+Go „langsam“ und „schnell“
- Teilweise Anpassung der Straßentypen innerorts an das modifizierte VS-Schema.

Die folgenden Tabellen zeigen die aktualisierten Anteile der Fahrleistungen in Deutschland nach Höchstgeschwindigkeitsklassen (Tabelle 17) und Level of Service (Tabelle 18).

Tabelle 17: Anteil der Fahrleistungen nach Höchstgeschwindigkeitsklassen in Deutschland im HBEFA 4.1 und in TREMOD 6

Höchstgeschwindigkeitsklasse	∅-Autobahn	∅-Außerorts	∅-Urban
------------------------------	------------	-------------	---------

Höchstgeschwindigkeitsklasse	Ø-Autobahn	Ø-Außerorts	Ø-Urban
>130	59%		
TL 130	7%		
TL 120	12%		
TL 110		4%	
TL 100	16%	32%	
TL 80	4%	65%	
TL 70			15%
TL 50			67%
TL 30			13%
St+Go	2%		5%
Gesamt	100%	100%	100%

Tabelle 18: Anteil der Fahrleistungen nach Level of Service in Deutschland im HBEFA 4.1 und in TREMOD 6

Level of Service	Ø-Autobahn	Ø-Außerorts	Ø-Urban
Freeflow	53%	86%	8%
Heavy	35%	14%	57%
Saturated	10%		29%
St+Go 1	1,1%		2,5%
St+Go 2	0,6%		2,5%
Gesamt	100%	100%	100%

2.2.3.5 Aktualisierung der Kaltstart- und Verdampfungsemissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren für Kaltstart und Verdampfung wurden aktualisiert:

- ▶ Für die Kaltstart-Emissionsfaktoren ist die Methodik unverändert geblieben, aber es wurden neue Messdaten aufgenommen.
- ▶ Die Methodik der Verdampfungsemission wurde traditionell aus dem COPERT-Modell übernommen. In HBEFA 4.1 wurde sie auf die Methodik von COPERT V aktualisiert (entspricht der Tier-3-Methode im EMEP/EWR 2016 Emission Inventory Guidebook).

2.2.3.6 Aktualisierung nicht geregelter Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren von nicht regulierten Schadstoffen wie HC-Arten, NO₂, N₂O, NH₃ und Nicht-Emissions-Partikeln wurden auf der Grundlage neuer Messdaten und Literatur aktualisiert. PM-Nichtauspuff und BC sind jetzt in der Public Version von HBEFA 4.1 verfügbar.

2.2.3.7 Vereinfachte Segmentierung

Die Größenklassen von Pkw und Motorrädern wurden in HBEFA 4.1 vereinfacht:

- ▶ Für Pkw werden keine Größenklassen mehr unterschieden.
- ▶ Für Motorräder werden weniger Größenklassen unterschieden.

Die Unterscheidung der Pkw in drei Kapazitätsklassen wird demnach nicht mehr vorgenommen. Die Gründe hierfür sind:

- ▶ Durch diese Vereinfachung gehen keine tatsächlichen Informationen verloren. Für Luftschadstoffe wurden bereits in den Vorgängerversionen der HBEFA für alle drei Größenklassen die gleichen EF verwendet. Die differenzierten Faktoren Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emission wurden nicht gemessen, sondern kalibriert - basierend auf den gleichen Informationen, die auch in HBEFA 4.1 noch verwendet werden, d.h. CO₂-Überwachung plus sekundäre Informationen wie Kraftstoffprotokolle oder Kraftstoffverkauf.
- ▶ Es gibt keine gesetzliche Differenzierung, z.B. hinsichtlich der Grenzwerte, innerhalb der Pkw.
- ▶ Die bisher verwendeten Hubraumklassen haben immer mehr an Bedeutung verloren. Mit der Verkleinerung des Motors korrelieren die Hubraumklassen nicht mehr so gut mit der Motorleistung. Andererseits war eine offensichtliche Klassifizierung, die gut akzeptiert worden wäre und für die Daten zur Umsetzung in allen HBEFA-Ländern verfügbar wären, nicht vorhanden. So sind z.B. die in Deutschland bisher in TREMOD verwendeten "Marktsegmente" in den Registrierungsdatenbanken der anderen HBEFA-Länder nicht verfügbar.

Darüber hinaus werden alternative Antriebe für Lkw, die in HBEFA 4.1 neu eingeführt wurden (z.B. BEV, CNG, PHEV), nicht durch die gleichen detaillierten Größenklassen wie herkömmliche Lkw, sondern nur durch 3 Größenklassen für Solo-Lkw und eine Größenklasse für Last- und Sattelzüge unterschieden.

2.2.3.8 Software Updates der Diesel Pkw

Das HBEFA sollte die Software-Updates nach dem Dieselgate-Skandal berücksichtigen. In HBEFA 4.1 sind die Emissionsfaktoren für die Euro-5-Dieselfahrzeuge mit einem EZ189-Motor, die in der obligatorischen Aktualisierungsrunde aktualisiert wurden, basierend auf der aktuellen Verfügbarkeit von Messdaten, verfügbar (Matzer et al. 2019).

2.2.3.9 Realer Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen

In einem vom UBA Deutschland in Auftrag gegebenen Projekt (Althaus et al. 2019) wurden der reale Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen von Pkw detailliert bewertet. Die Ergebnisse wurden in HBEFA 4.1 integriert. Der Kraftstoffverbrauch basiert nicht mehr nur auf Euro-3 Benzin- und Diesel-Pkw, sondern auch auf Basiswerten für alle Technologien und Abgasnormen. Diese werden nach Land und Jahr kalibriert, basierend auf dem CO₂-Monitoring und den realen Zuschlägen.

2.2.3.9.1 Pkw

Der spezifische Energieverbrauch der Kraftfahrzeuge in TREMOD basiert auf den im HBEFA vorgegebenen Verbrauchsfaktoren der Fahrzeugschichten, die mit dem PHEM-Modell der TU Graz für die Verkehrssituationen im realen Fahrbetrieb ermittelt wurden ((Althaus et al. 2019) und (Matzer et al. 2019)). Basis sind die Werte des vom KBA durchgeführten CO₂-Monitoring auf Basis der Typzulassungswerte. In diesem werden die im NEFZ ermittelten CO₂-Werte aller Neuzulassungen in Deutschland dokumentiert. In dem genannten Vorhaben wurde eine Methode zur Berücksichtigung des realen Kraftstoffverbrauchs abgeleitet, bei dem für jede Antriebstechnologie Zuschläge auf den Typprüfwert abgeleitet werden. Tabelle 19 zeigt die Typprüfwerte für Benzin- und Dieselfahrzeuge sowie die im Vorhaben abgeleiteten Zuschläge und die resultierenden Realverbrauchswerte.

Tabelle 19: CO₂-Emissionen aus der Typzulassung und abgeleitete reale CO₂-Emissionen der Pkw-Zulassungen in Deutschland 1995 bis 2018

	Benzin Testzyklus (g CO₂/km)	Benzin Zuschlag Real	Benzin Real (g CO₂/km)	Diesel Testzyklus (g CO₂/km)	Diesel Zuschlag Real	Diesel Real (g CO₂/km)
1995	197,0	7%	210,8	195,7	8%	211,3
1996	194,6	7%	208,2	189,1	8%	204,4
1997	192,6	7%	206,0	185,4	8%	200,5
1998	190,2	7%	203,5	178,4	8%	192,9
1999	187,9	7%	201,1	171,4	8%	185,3
2000	187,5	7%	200,6	168,2	8%	181,8
2001	185,2	7%	198,2	167,7	8%	181,3
2002	182,0	8%	196,7	169,2	10%	186,2
2003	179,7	9%	195,7	170,1	10%	187,1
2004	178,1	10%	196,1	170,5	10%	187,6
2005	174,6	12%	196,3	171,1	12%	191,1
2006	171,7	13%	193,3	173,4	11%	192,8
2007	168,1	14%	192,4	171,0	13%	193,1
2008	163,7	17%	191,0	166,0	15%	190,1
2009	150,9	18%	178,7	159,7	16%	184,9
2010	150,7	20%	181,3	153,3	18%	180,9
2011	145,6	23%	178,9	146,9	22%	179,8
2012	141,1	25%	176,8	143,3	25%	179,0
2013	135,7	29%	175,0	138,7	30%	180,0
2014	132,4	32%	174,7	135,2	33%	180,1
2015	129,0	35%	173,7	132,0	37%	181,1

	Benzin Testzyklus (g CO ₂ /km)	Benzin Zuschlag Real	Benzin Real (g CO ₂ /km)	Diesel Testzyklus (g CO ₂ /km)	Diesel Zuschlag Real	Diesel Real (g CO ₂ /km)
2016	128,2	36%	174,4	129,9	40%	181,6
2017	127,6	36%	173,6	132,1	42%	187,6
2018	130,6	36,5%	178,3	135,2	42,5%	192,6

Quelle: (Althaus et al. 2019)

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die aus den NEFZ für das HBEFA abgeleiteten CO₂-Emissionen nach Eurostufen und zum Vergleich die entsprechenden Werte aus dem Spritmonitor.

Tabelle 20: CO₂-Emissionen von NEFZ, Spritmonitor.de und HBEFA für die EURO-Klassen 3 bis 6a,b vom Diesel-Durchschnitts-Pkw

	EURO 3	EURO 4	EURO 5	EURO 6a,b
NEFZ in g/km (Messung)	169,3	168,1	144,3	129,2
Spritmonitor.de in g/km	185,8	191,1	183,7	183,7
HBEFA in g/km	184,8	190,6	182,3	182,3

Quelle: (Althaus et al. 2019)

Tabelle 21: CO₂-Emissionen von NEFZ, Spritmonitor.de und HBEFA für die EURO-Klassen 3 bis 6a,b vom Otto-Durchschnitts-Pkw

	EURO 3	EURO 4	EURO 5	EURO 6a,b
NEFZ in g/km (Messung)	184,4	171,9	141,0	129,3
Spritmonitor.de in g/km	198,1	193,3	177,6	174,9
HBEFA in g/km	198,6	194,7	178,2	175,4

Quelle: (Althaus et al. 2019)

Im HBEFA wurden diese Anpassungsfaktoren erst ab der Stufe Euro 3 (Zulassungsjahre ab 1995) verwendet. Da für das Verbrauchsniveau der Zulassungsjahre vor 1995 keine neuen Erkenntnisse vorlagen, wurden die Verbrauchsentwicklung der älteren Baujahre in TREMOD so angepasst, dass der berechnete Gesamtverbrauch der Jahre vor 1995 etwa dem bisherigen Niveau der Berechnungsergebnisse entspricht. Dazu wurden für die Benzin-Pkw folgende Korrekturen auf die HBEFA-Verbrauchswerte vorgenommen:

- ▶ Euro-2: +2%
- ▶ Euro-1: +3%
- ▶ Euro-0: +8%

Bei den Diesel-Pkw und den anderen Antriebskonzepten waren keine Anpassungen notwendig.

2.2.3.9.2 Leichte Nutzfahrzeuge

Im Vorhaben (Althaus et al. 2019) wurde der Realverbrauch der leichten Nutzfahrzeuge nach der gleichen Methode wie bei den Pkw ermittelt. Die nachfolgenden Tabellen zeigen das Ergebnis für die CO₂-Emissionen der leichten Nutzfahrzeuge nach Eurostufen.

Tabelle 22: CO₂-Emissionen von NEFZ, Spritmonitor.de und HBEFA die EURO-Klassen 3 bis 6a,b von leichten Nutzfahrzeugen I-III Diesel-Durchschnitt

	EURO 3	EURO 4	EURO 5	EURO 6a,b
NEFZ in g/km (Messung)	180,5	180,3	178,2	172,0
Spritmonitor.de in g/km	208,2	217,1	227,5	224,9
HBEFA in g/km	264,2	260,8	262,6	258,6

Quelle: (Althaus et al. 2019)

Tabelle 23: CO₂-Emissionen von NEFZ, Spritmonitor.de und HBEFA für die EURO-Klassen 3 bis 6a,b von leichten Nutzfahrzeugen I-III Otto-Durchschnitt

	EURO 3	EURO 4	EURO 5	EURO 6a,b
NEFZ in g/km (Messung)	172,6	172,2	169,8	163,7
Spritmonitor.de in g/km	199,9	208,0	220,4	220,4
HBEFA in g/km	212,0	202,7	184,6	170,3

Quelle: (Althaus et al. 2019)

2.2.3.9.3 Übrige Fahrzeuge

Bei den übrigen Fahrzeugkategorien (motorisierte Zweiräder, Busse, schwere Lkw) wurden die spezifischen Energieverbrauchswerte mit dem aktualisierten PHEM-Modell für das HBEFA 4.1 neu berechnet (Matzer et al. 2019) und in TREMOD übernommen.

2.2.4 Vergleich der Ergebnisse 1990-2018

In diesem Kapitel werden wichtige Ergebnisse der TREMOD-Versionen 6.01 vom 22.10.2019 dargestellt, erläutert und der vorigen Version 5.82 vom 19.09.2018 gegenübergestellt (im Folgenden bezeichnet als TREMOD 6.0 bzw. 5.8). Im Fokus stehen hierbei die Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern sowie die Entwicklung der Stickstoffoxid- und Partikelemissionen. Unterschiede zwischen den Versionen ergeben sich aus geänderten Verkehrsmengengerüsten, d.h. den Fahrleistungen beim Straßenverkehr und den spezifischen Energieverbrauchs- und Emissionsfaktoren im Straßenverkehr und im Flugverkehr.

2.2.4.1 Fahrleistungen

In TREMOD 6.0 wurden die Fahrleistungen gegenüber TREMOD 5.8 aufgrund der Ergebnisse der Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al. 2016) und anderer aktueller Quellen (z.B. „Verkehr in Kilometern“ (KBA, n.d.)) geändert. Bei den Pkw sind die Fahrleistungen bis 2014 ähnlich hoch und bis 2018 etwas niedriger als bisher. Bei den schweren Nutzfahrzeugen sind die Fahrleistungen aufgrund der Ergebnisse der Fahrleistungserhebung 2014 durchgehend höher.

Bei den leichten Nutzfahrzeugen ist seit 2014 ein stärkerer Anstieg der Fahrleistungen zu beobachten (KBA, n.d.).

Tabelle 24: Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 – Fahrleistungen

Jahr	FL gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1991	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1992	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1993	-0,10%	-0,01%	-5,34%	1,65%	0,00%	-0,71%	5,23%
1994	0,07%	0,00%	-6,39%	-3,14%	3,42%	1,47%	0,00%
1995	0,30%	0,00%	-6,06%	-6,36%	6,88%	3,03%	0,00%
1996	0,40%	0,00%	-3,99%	-9,14%	6,45%	4,03%	0,00%
1997	0,40%	0,00%	-2,91%	-9,64%	4,39%	4,53%	0,00%
1998	0,38%	0,00%	-3,03%	-7,98%	2,59%	5,04%	0,00%
1999	0,54%	0,00%	0,06%	-5,58%	2,76%	5,69%	0,00%
2000	0,50%	0,00%	-1,88%	-3,25%	1,94%	6,57%	-3,97%
2001	0,40%	0,00%	-4,58%	-3,43%	2,44%	5,25%	0,00%
2002	0,25%	0,00%	-5,23%	-1,28%	0,00%	4,88%	0,00%
2003	0,19%	0,00%	-6,45%	0,83%	-0,55%	4,75%	-0,42%
2004	0,10%	0,00%	-8,24%	3,81%	-1,06%	4,37%	-0,87%
2005	0,15%	-0,01%	-8,34%	3,56%	-0,86%	5,58%	-2,62%
2006	0,15%	-0,01%	-11,53%	2,27%	-0,48%	6,52%	-8,67%
2007	0,63%	-0,01%	4,81%	5,13%	-0,04%	7,19%	-11,16%
2008	0,64%	-0,02%	0,88%	4,98%	2,21%	6,99%	-13,77%
2009	0,58%	-0,03%	-0,56%	6,66%	3,54%	6,44%	-16,13%
2010	0,50%	-0,03%	-3,76%	7,61%	4,37%	5,61%	-18,60%
2011	0,32%	-0,03%	-8,73%	7,03%	3,92%	5,07%	-19,48%
2012	0,33%	-0,03%	-12,18%	6,12%	3,75%	6,61%	-20,33%
2013	0,35%	-0,02%	-14,24%	8,74%	4,38%	6,97%	-21,21%
2014	0,02%	-0,24%	-15,39%	12,46%	8,01%	5,15%	-22,03%
2015	-0,34%	-1,02%	-13,55%	13,95%	9,07%	5,18%	-26,39%
2016	-0,95%	-2,02%	-12,11%	14,22%	14,23%	4,27%	-27,39%
2017	-1,12%	-2,47%	-12,09%	12,00%	17,72%	5,03%	-31,99%

Quelle: TREMOD 5.82 vom 19.09.2018 und TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

2.2.4.2 Energieverbrauch

Die geänderten Annahmen bei der Fahrleistung und der Entwicklung der spezifischen Energieverbrauchswerte bedeuten auch bei der Verbrauchs- und Emissionsentwicklung z.T. deutliche Unterschiede zwischen den Versionen. Die folgende Tabelle zeigt die Änderung des spezifischen Energieverbrauchs der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD Version 5.8 je Fahrzeugkategorie. Es zeigt sich, dass die aktualisierte Modellierung im HBEFA 4.1 bei allen Fahrzeugkategorien zu höheren Verbrauchsfaktoren führt. Bei den Pkw und LNF nehmen die Unterschiede im Zeitverlauf zu. Grund dafür sind die zunehmenden Differenzen zwischen dem realen Kraftstoffverbrauch und den Testzykluswerten. Insgesamt führt das zu einer zunehmenden Differenz zu den Ergebnissen der Version 5.8.

Tabelle 25: Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 – spezifischer Energieverbrauch

Jahr	MJ/km	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	1,9%	-0,5%	-2,1%	5,0%	14,3%	8,9%	19,8%
1991	2,3%	-0,4%	2,2%	5,3%	15,0%	9,4%	20,1%
1992	2,8%	0,0%	4,8%	5,7%	15,6%	10,0%	20,3%
1993	3,0%	0,2%	-1,4%	2,6%	16,0%	11,0%	23,3%
1994	2,9%	-0,6%	16,3%	3,1%	16,3%	10,4%	15,0%
1995	3,5%	-0,4%	19,0%	2,7%	15,4%	11,3%	16,0%
1996	4,1%	-0,1%	19,4%	3,1%	15,4%	12,3%	16,8%
1997	4,7%	0,2%	20,8%	3,1%	15,7%	13,3%	17,3%
1998	5,3%	0,5%	23,2%	3,5%	16,3%	14,1%	17,9%
1999	6,0%	0,9%	23,4%	4,0%	17,1%	14,6%	18,8%
2000	6,5%	1,1%	22,9%	4,6%	18,3%	14,9%	16,6%
2001	6,3%	1,0%	24,6%	4,8%	18,7%	15,0%	18,6%
2002	6,5%	1,4%	22,7%	5,5%	18,8%	14,8%	19,5%
2003	6,8%	1,6%	24,4%	6,0%	18,8%	14,6%	20,1%
2004	7,2%	2,2%	24,3%	7,4%	18,9%	14,2%	21,1%
2005	7,1%	2,0%	23,3%	6,7%	19,0%	13,6%	19,5%
2006	8,1%	3,4%	23,0%	6,2%	18,6%	13,1%	16,8%
2007	8,4%	4,0%	23,7%	6,4%	18,2%	12,7%	16,4%
2008	8,4%	4,1%	22,4%	6,1%	18,0%	12,2%	16,7%
2009	8,2%	4,3%	19,7%	8,2%	18,5%	11,6%	16,5%
2010	8,1%	4,4%	18,9%	7,0%	19,2%	11,2%	15,9%
2011	8,2%	4,6%	18,3%	6,7%	20,4%	11,0%	15,8%
2012	8,4%	4,6%	17,5%	5,4%	21,4%	10,4%	15,8%

Jahr	MJ/km	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2013	8,6%	4,7%	16,0%	5,3%	22,6%	10,2%	15,7%
2014	8,8%	5,2%	16,2%	5,5%	23,8%	9,9%	15,8%
2015	8,2%	4,2%	12,7%	5,8%	24,7%	9,5%	15,5%
2016	9,3%	5,4%	13,1%	5,1%	26,2%	10,0%	16,2%
2017	10,1%	6,3%	13,3%	4,1%	27,5%	9,7%	16,0%

Quelle: TREMOD 5.82 vom 19.09.2018 und TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

Der gesamte Energieverbrauch des Inlandsverkehrs ergibt sich aus dem Produkt der Fahrleistungen und der spezifischen Energieverbrauchswerte (Tabelle 26). Die Ergebnisse zeigen eine Zunahme des Energieverbrauchs des Straßenverkehrs über den gesamten Zeitraum, getrieben von den Pkw, LNF und SNF.

Tabelle 26: TREMOD-Version 6.0 – gesamter Energieverbrauch Inland

Jahr	EV gesamt (PJ)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	1.980	1.451	21	56	52	381	21
1991	2.080	1.470	20	55	57	455	23
1992	2.129	1.502	20	54	63	466	24
1993	2.155	1.532	18	53	70	456	27
1994	2.210	1.525	18	52	79	504	33
1995	2.251	1.533	19	50	85	530	33
1996	2.277	1.538	20	50	91	544	34
1997	2.307	1.538	21	49	97	568	34
1998	2.345	1.556	22	48	103	581	35
1999	2.400	1.578	24	48	110	605	35
2000	2.399	1.567	24	48	117	610	33
2001	2.429	1.589	24	48	123	608	36
2002	2.444	1.602	25	49	126	607	36
2003	2.425	1.575	25	49	127	614	36
2004	2.459	1.602	25	51	127	617	37
2005	2.402	1.558	25	51	132	601	37
2006	2.428	1.563	24	50	137	635	20
2007	2.452	1.564	25	50	139	656	19
2008	2.419	1.544	24	49	139	646	18
2009	2.385	1.564	24	51	140	589	17

Jahr	EV gesamt (PJ)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2010	2.405	1.563	23	52	140	610	17
2011	2.427	1.576	22	51	142	620	17
2012	2.405	1.564	22	51	143	609	17
2013	2.413	1.565	21	52	144	614	17
2014	2.441	1.581	21	54	151	617	17
2015	2.440	1.565	21	55	159	624	17
2016	2.466	1.575	21	55	166	632	17
2017	2.485	1.581	21	54	174	640	16
2018	2.491	1.570	21	53	182	648	16

Quelle: TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

Die Änderung des Inlandsverbrauchs der TREMOD-Version 6.0 gegenüber der Version 5.8 ist in Tabelle 27 dargestellt. Die Entwicklung wird dominiert durch die Änderungen der spezifischen Verbrauchswerte, die deutlich größer ist als die Unterschiede bei den Fahrleistungen. Die Unterschiede gegenüber der Version 5.8 nehmen daher dementsprechend im Zeitverlauf zu und liegen im Jahr 2017 fast 9 % höher.

Tabelle 27: Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 –Energieverbrauch Inland

Jahr	EV gesamt (PJ)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	1,87%	-0,46%	-2,06%	5,04%	14,29%	8,86%	19,84%
1991	2,33%	-0,41%	2,19%	5,29%	15,00%	9,39%	20,13%
1992	2,82%	-0,04%	4,80%	5,69%	15,59%	10,04%	20,26%
1993	2,93%	0,15%	-6,68%	4,26%	15,96%	10,20%	29,76%
1994	3,00%	-0,56%	8,83%	-0,16%	20,29%	12,03%	15,00%
1995	3,80%	-0,41%	11,77%	-3,88%	23,31%	14,70%	15,95%
1996	4,50%	-0,08%	14,63%	-6,30%	22,84%	16,81%	16,84%
1997	5,13%	0,21%	17,32%	-6,84%	20,82%	18,39%	17,32%
1998	5,71%	0,49%	19,44%	-4,78%	19,31%	19,81%	17,85%
1999	6,52%	0,86%	23,43%	-1,78%	20,31%	21,17%	18,81%
2000	7,00%	1,10%	20,64%	1,15%	20,59%	22,46%	12,00%
2001	6,74%	0,99%	18,91%	1,16%	21,60%	21,05%	18,65%
2002	6,81%	1,37%	16,29%	4,13%	18,77%	20,44%	19,48%
2003	7,02%	1,60%	16,36%	6,87%	18,14%	20,03%	19,60%

Jahr	EV gesamt (PJ)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2004	7,28%	2,17%	14,07%	11,54%	17,61%	19,18%	20,02%
2005	7,31%	2,03%	12,99%	10,50%	17,97%	19,90%	16,36%
2006	8,31%	3,34%	8,79%	8,65%	18,02%	20,43%	6,71%
2007	9,13%	3,96%	29,62%	11,86%	18,11%	20,77%	3,40%
2008	9,10%	4,09%	23,50%	11,34%	20,66%	20,04%	0,61%
2009	8,86%	4,32%	18,98%	15,39%	22,75%	18,81%	-2,28%
2010	8,68%	4,39%	14,40%	15,12%	24,37%	17,39%	-5,69%
2011	8,58%	4,53%	7,94%	14,16%	25,11%	16,66%	-6,72%
2012	8,80%	4,61%	3,22%	11,82%	25,92%	17,74%	-7,76%
2013	9,02%	4,72%	-0,52%	14,51%	27,96%	17,85%	-8,81%
2014	9,01%	4,94%	-1,69%	18,61%	33,67%	15,60%	-9,75%
2015	7,83%	3,10%	-2,54%	20,53%	36,00%	15,17%	-15,01%
2016	8,24%	3,27%	-0,63%	20,03%	44,21%	14,69%	-15,63%
2017	8,86%	3,70%	-0,44%	16,61%	50,08%	15,19%	-21,10%

Quelle: TREMOD 5.82 vom 19.09.2018 und TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

Tabelle 28 zeigt die Ergebnisse des Energieverbrauchs nach Energiebilanz und damit die für die Berichterstattung relevanten Mengen und die Aufteilung auf die Fahrzeugkategorien, die sich aus den Inlandsergebnissen mit den in Kapitel 2.1.5. erläuterten Anpassungsfaktoren ergibt. Die Absatzzahlen zeigen nur eine geringe Zunahme des Energieverbrauchs im Zeitverlauf und nach dem Jahr 2000 zunächst rückläufige Mengen. Der Unterschied wird überwiegend auf zunehmende graue Kraftstoffimporte zurück geführt (siehe Kapitel 2.1.5.).

Tabelle 28: TREMOD-Version 6.0 – gesamter Energieverbrauch nach Energiebilanz

Jahr	EV gesamt (PJ)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	2.066	1.517	22	57	54	394	22
1991	2.117	1.534	21	51	60	428	23
1992	2.198	1.561	21	55	65	472	25
1993	2.258	1.586	18	57	72	496	29
1994	2.209	1.517	17	52	78	510	33
1995	2.265	1.552	19	50	86	525	34
1996	2.267	1.552	20	48	92	521	33
1997	2.281	1.543	21	46	97	540	34
1998	2.327	1.539	22	48	101	582	34

Jahr	EV gesamt (PJ)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1999	2.403	1.560	24	50	109	626	35
2000	2.357	1.516	23	49	113	623	33
2001	2.314	1.509	23	46	117	584	34
2002	2.293	1.510	23	45	119	563	34
2003	2.218	1.470	23	42	118	532	32
2004	2.225	1.487	23	43	118	522	33
2005	2.152	1.430	23	42	121	504	32
2006	2.166	1.402	22	45	122	557	17
2007	2.137	1.386	22	43	123	547	16
2008	2.105	1.368	21	42	123	537	15
2009	2.090	1.374	21	46	122	512	15
2010	2.110	1.349	20	48	121	556	16
2011	2.133	1.374	19	47	123	554	15
2012	2.118	1.332	18	50	121	581	16
2013	2.164	1.363	18	51	125	591	16
2014	2.184	1.402	19	50	134	563	16
2015	2.189	1.382	18	52	140	582	15
2016	2.231	1.408	19	52	149	588	16
2017	2.274	1.438	19	50	159	593	15
2018	2.203	1.381	19	48	161	580	15

Quelle: TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

Tabelle 29 zeigt die Änderungen der Ergebnisse des Energieverbrauchs nach Energiebilanz der Version 6.0 gegenüber der Version 5.8. Beim gesamten Absatz besteht erwartungsgemäß kein Unterschied, da diese Werte durch die AG Energiebilanzen vorgegeben werden. Lediglich 2017 gibt es eine Änderung durch die Verwendung der aktualisierten Energiebilanz 2017 gegenüber der vorläufigen Energiebilanz in der Version 5.8.

Unterschiede ergeben sich jedoch für die einzelnen Fahrzeugkategorien. Wesentlicher Grund sind die Unterschiede der Fahrleistungen und vor allem der spezifischen Energieverbrauchswerte je Fahrzeugkategorie, aus denen unterschiedliche Anpassungsfaktoren abgeleitet werden. Im Ergebnis ändert sich dadurch die Verteilung des Gesamtverbrauchs auf die Fahrzeugkategorien.

Tabelle 29: Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 – gesamter Energieverbrauch nach Energiebilanz

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
------	--------	-----	-----	-----	-----	-----	----------

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	0,0%	0,4%	-1,6%	-8,2%	15,3%	-2,8%	16,9%
1991	0,0%	0,5%	2,8%	-6,7%	16,1%	-3,7%	15,2%
1992	0,0%	0,9%	6,4%	-8,3%	16,8%	-4,5%	14,5%
1993	0,0%	0,7%	-5,6%	-9,0%	17,0%	-4,0%	22,2%
1994	0,0%	0,8%	10,3%	-14,5%	22,0%	-4,0%	6,6%
1995	0,0%	1,5%	13,9%	-21,0%	25,7%	-5,7%	5,6%
1996	0,0%	1,4%	16,4%	-24,1%	24,7%	-5,4%	5,6%
1997	0,0%	1,4%	18,8%	-25,3%	22,3%	-5,1%	5,4%
1998	0,0%	1,0%	20,1%	-23,6%	20,0%	-3,8%	5,3%
1999	0,0%	1,0%	23,6%	-22,2%	20,5%	-4,0%	5,1%
2000	0,0%	2,2%	21,9%	-22,5%	21,9%	-6,2%	-2,8%
2001	0,0%	1,6%	19,6%	-21,4%	22,3%	-6,0%	4,1%
2002	0,0%	1,7%	16,7%	-19,1%	19,2%	-6,5%	5,0%
2003	0,0%	2,3%	17,2%	-18,3%	19,0%	-8,3%	4,8%
2004	0,0%	1,5%	13,3%	-12,7%	16,9%	-6,7%	5,7%
2005	0,0%	1,4%	12,3%	-13,8%	17,3%	-6,4%	2,3%
2006	0,0%	0,6%	5,8%	-11,5%	14,7%	-3,0%	-10,7%
2007	0,0%	0,0%	24,6%	-8,2%	13,4%	-2,3%	-13,3%
2008	0,0%	-0,1%	18,3%	-7,8%	15,5%	-2,2%	-15,3%
2009	0,0%	-0,3%	13,5%	-3,5%	16,9%	-2,2%	-17,5%
2010	0,0%	-0,5%	8,8%	-2,2%	18,2%	-1,6%	-19,7%
2011	0,0%	-0,4%	2,5%	-2,4%	18,7%	-1,6%	-20,0%
2012	0,0%	-0,5%	-2,1%	-4,5%	19,2%	-0,9%	-21,7%
2013	0,0%	-0,5%	-5,8%	-3,0%	21,1%	-1,2%	-22,9%
2014	0,0%	-0,6%	-7,1%	1,0%	26,3%	-2,5%	-22,8%
2015	0,0%	0,8%	-5,0%	-0,8%	32,6%	-6,1%	-29,3%
2016	0,0%	0,9%	-3,2%	-2,4%	40,6%	-7,4%	-30,3%
2017	0,6%	2,2%	-2,2%	-7,0%	47,7%	-8,8%	-35,7%

Quelle: TREMOD 5.82 vom 19.09.2018 und TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

2.2.4.3 Stickstoffoxidemissionen

Die spezifischen Stickstoffoxidemissionen sind im betrachteten Zeitraum bei allen Fahrzeugkategorien rückläufig. Allerdings wurden bei Pkw und LNF seit dem Jahr 2000 keine weiteren Fortschritte erzielt (Tabelle 30). Dabei gibt es große Unterschiede gegenüber der Version 5.8. Die Änderung der Ergebnisse für die Stickstoffoxidemissionen ergibt sich zu einem

großen Teil aus den im HBEFA 4.1 aktualisierten Emissionsfaktoren (siehe Kapitel 2.2.3). Diese sind bei nahezu allen Fahrzeugkategorien und Eurostufen höher als im HBEFA 3.3, welches Grundlage für die TREMOD-Version 5.8 war. Dies ist sowohl auf die verbesserte Modellierung im PHEM-Modell als auch auf die neu integrierten Messdaten für neue Fahrzeugkonzepte zurückzuführen.

Tabelle 30: TREMOD-Version 6.0 – NO_x-Emissionsfaktoren (in g/km)

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	2,226	1,483	0,149	14,399	2,111	11,894	3,030
1991	2,176	1,302	0,178	14,783	2,082	11,784	3,026
1992	2,060	1,178	0,209	15,129	2,058	11,701	2,999
1993	1,925	1,079	0,207	14,969	2,030	11,381	3,126
1994	1,920	1,011	0,218	14,541	1,865	11,550	3,491
1995	1,847	0,940	0,218	13,754	1,788	11,095	3,419
1996	1,755	0,871	0,216	13,026	1,747	10,527	3,316
1997	1,694	0,803	0,217	12,493	1,710	10,230	3,251
1998	1,618	0,738	0,217	12,105	1,659	9,960	3,185
1999	1,555	0,677	0,214	11,709	1,584	9,759	3,131
2000	1,482	0,615	0,206	11,428	1,504	9,518	2,964
2001	1,445	0,616	0,208	11,108	1,458	9,274	3,106
2002	1,397	0,612	0,205	10,726	1,458	8,890	3,043
2003	1,369	0,610	0,206	10,236	1,479	8,511	2,947
2004	1,348	0,623	0,204	10,189	1,514	8,251	2,940
2005	1,315	0,619	0,200	9,887	1,541	7,977	2,896
2006	1,298	0,619	0,200	9,435	1,561	7,569	4,149
2007	1,253	0,620	0,194	9,053	1,589	6,861	3,987
2008	1,162	0,614	0,187	8,444	1,621	5,878	3,814
2009	1,066	0,606	0,177	8,206	1,643	5,216	3,687
2010	1,030	0,598	0,171	7,748	1,654	4,742	3,516
2011	0,996	0,600	0,166	7,311	1,664	4,311	3,349
2012	0,961	0,599	0,161	6,539	1,657	3,973	3,217
2013	0,937	0,601	0,155	6,299	1,650	3,674	3,085
2014	0,900	0,602	0,150	5,878	1,633	3,257	2,956
2015	0,852	0,594	0,143	5,742	1,620	2,749	2,772
2016	0,801	0,577	0,139	5,262	1,583	2,320	2,583

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2017	0,745	0,551	0,135	4,520	1,481	1,994	2,279
2018	0,689	0,520	0,130	3,729	1,345	1,748	2,062

Quelle: TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

Tabelle 31 stellt die Unterschiede der Stickstoffoxidemissionsfaktoren der TREMOD-Version 6.0 gegenüber der Version 5.8 dar. Es wird deutlich, dass die aktuellen Messergebnisse in Kombination mit der Berücksichtigung weiterer relevanter Einflussgrößen bei der Modellierung im PHEM-Modell für neuere Fahrzeugkonzepte deutlich höhere NO_x-Emissionen bei Pkw, LNF und SNF ergeben.

Tabelle 31: Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 – spezifische NO_x-Emissionsfaktoren (Bezug g/km)

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	0,5%	-11,4%	-39,5%	24,3%	4,6%	25,2%	23,3%
1991	3,6%	-10,2%	-36,5%	25,3%	3,6%	25,8%	22,9%
1992	3,8%	-10,7%	-37,9%	26,0%	2,8%	25,3%	21,7%
1993	4,3%	-10,2%	-45,8%	22,6%	2,0%	25,8%	28,0%
1994	11,1%	0,6%	-18,3%	19,1%	4,2%	22,5%	12,5%
1995	10,7%	-0,9%	-17,0%	16,9%	4,3%	21,9%	12,7%
1996	10,6%	-1,8%	-16,8%	16,3%	4,3%	21,5%	13,2%
1997	10,7%	-2,6%	-15,7%	15,1%	4,8%	21,3%	13,3%
1998	10,9%	-3,2%	-14,1%	14,1%	4,8%	20,8%	13,3%
1999	11,5%	-2,9%	-14,2%	13,3%	3,8%	20,1%	13,8%
2000	11,4%	-3,7%	-16,4%	12,7%	2,0%	19,2%	8,9%
2001	12,4%	0,3%	-15,0%	11,8%	2,1%	18,9%	12,3%
2002	14,2%	4,7%	-15,3%	11,4%	5,8%	18,9%	12,9%
2003	16,7%	9,6%	-14,2%	11,4%	10,0%	19,2%	13,3%
2004	20,0%	16,5%	-13,4%	12,6%	14,7%	19,9%	14,8%
2005	23,4%	21,6%	-12,9%	11,2%	16,4%	22,0%	13,2%
2006	26,5%	26,6%	-9,8%	9,5%	18,8%	22,9%	15,7%
2007	29,4%	31,8%	-14,6%	8,8%	26,8%	23,8%	14,2%
2008	34,4%	41,2%	-14,6%	6,8%	38,2%	24,7%	12,5%
2009	36,9%	44,8%	-16,4%	9,5%	45,8%	24,7%	11,7%
2010	38,0%	45,6%	-17,0%	7,6%	52,4%	25,9%	9,7%
2011	38,9%	44,7%	-17,8%	6,9%	58,6%	27,8%	8,4%
2012	38,8%	42,1%	-18,5%	-1,1%	63,7%	29,0%	7,7%

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2013	39,1%	40,1%	-19,9%	0,2%	67,7%	30,7%	6,4%
2014	38,7%	38,9%	-20,9%	0,0%	69,2%	31,0%	5,4%
2015	39,6%	37,9%	-23,4%	6,9%	71,6%	32,8%	2,8%
2016	41,6%	38,1%	-23,9%	8,0%	72,8%	37,7%	5,3%
2017	43,2%	37,7%	-24,6%	3,9%	74,9%	45,8%	2,8%

Quelle: TREMOD 5.82 vom 19.09.2018 und TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

Tabelle 32 zeigt die mit TREMOD Version 6.0 berechneten und für die Berichterstattung auf die Absatzzahlen der Energiebilanz angepassten gesamten Stickstoffoxidemissionen. Die Stickstoffoxidemissionen gehen im betrachteten Zeitraum deutlich zurück. Allerdings ist der Rückgang bei den Pkw durch den zunehmenden Anteil der Diesel-Pkw seit dem Jahr 2000 gestoppt worden.

Tabelle 32: TREMOD-Version 6.0 – NO_x-Emissionen nach Energiebilanz

Jahr	Gesamt (kt)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	1305	758	2	62	31	436	16
1991	1255	675	3	56	34	471	16
1992	1253	624	3	61	37	511	17
1993	1235	583	2	64	40	525	21
1994	1180	528	2	58	39	529	24
1995	1155	505	3	54	42	528	24
1996	1092	470	3	49	44	503	23
1997	1057	433	3	47	45	507	23
1998	1053	399	3	48	46	534	23
1999	1058	374	3	48	47	563	24
2000	999	333	3	47	46	549	22
2001	949	334	3	43	46	500	22
2002	909	334	3	40	48	463	22
2003	849	327	3	36	49	415	20
2004	840	339	3	36	50	392	20
2005	797	327	3	34	51	363	20
2006	802	322	3	33	51	381	12
2007	757	320	3	31	53	340	10
2008	699	315	3	28	55	290	9
2009	658	313	2	29	55	249	9

Jahr	Gesamt (kt)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2010	649	307	2	29	56	246	9
2011	635	316	2	26	57	225	8
2012	619	309	2	25	56	219	9
2013	619	320	2	25	58	206	8
2014	600	332	2	23	61	175	8
2015	578	330	2	23	64	153	7
2016	555	329	2	21	66	131	7
2017	527	322	2	18	66	114	6
2018	473	294	2	14	61	98	5

Quelle: TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

Tabelle 33 zeigt die Differenz der Stickstoffoxidemissionen der Version 6.0 gegenüber der Version 5.8. In der Version 5.8 war noch von einem deutlich stärkeren Rückgang der NO_x-Emissionen ausgegangen worden, die jedoch insbesondere bei den Diesel-Pkw und LNF nicht eingetreten sind. Die mit dem HBEFA 4.1 abgeleiteten Emissionsfaktoren führen im Ergebnis ab dem Jahr 2000 zu deutlich höheren NO_x-Emissionen. Im Jahr 2017 sind die NO_x-Emissionen um rund 31 % höher als bisher berechnet wurde.

Tabelle 33: Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 –NO_x-Emissionen nach Energiebilanz

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1995	1,75%	0,97%	-20,47%	-10,04%	13,63%	3,24%	0,25%
1996	0,56%	-0,27%	-18,89%	-14,42%	12,75%	2,32%	-0,32%
1997	-0,36%	-1,43%	-17,18%	-16,65%	10,79%	1,65%	-0,98%
1998	-0,69%	-2,68%	-16,24%	-15,68%	8,14%	1,89%	-0,99%
1999	-1,32%	-2,76%	-14,05%	-15,29%	6,86%	0,54%	-1,43%
2000	-3,36%	-2,69%	-17,12%	-16,45%	5,07%	-2,69%	-11,40%
2001	-1,96%	0,85%	-18,44%	-16,16%	5,22%	-2,76%	-4,01%
2002	-0,49%	5,01%	-19,43%	-14,58%	6,13%	-3,11%	-3,44%
2003	0,97%	10,44%	-19,16%	-14,18%	10,18%	-4,55%	-4,08%
2004	4,87%	15,71%	-21,00%	-8,50%	12,82%	-2,05%	-2,30%
2005	8,00%	20,91%	-20,61%	-10,17%	14,72%	0,49%	-5,63%
2006	11,22%	23,16%	-22,36%	-9,54%	15,02%	5,45%	-12,89%
2007	14,45%	26,85%	-13,97%	-7,25%	21,87%	7,29%	-16,07%
2008	19,64%	35,47%	-17,48%	-8,28%	35,31%	8,72%	-19,30%

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2009	22,52%	38,42%	-20,75%	-3,45%	43,99%	9,30%	-21,68%
2010	23,97%	38,75%	-24,05%	-2,61%	51,28%	11,43%	-24,52%
2011	25,46%	37,68%	-28,73%	-3,15%	56,46%	13,30%	-25,62%
2012	24,99%	35,06%	-32,17%	-11,36%	61,08%	15,74%	-27,80%
2013	25,48%	32,92%	-34,94%	-8,49%	65,80%	17,18%	-29,68%
2014	25,88%	31,22%	-36,76%	-5,04%	72,65%	16,08%	-30,24%
2015	27,44%	33,26%	-35,46%	-0,48%	82,44%	13,89%	-37,72%
2016	28,89%	32,00%	-34,84%	-0,27%	92,35%	15,96%	-37,46%
2017	30,97%	32,03%	-34,87%	-7,65%	102,19%	21,20%	-43,62%

Quelle: TREMOD 5.82 vom 19.09.2018 und TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

2.2.4.4 Abgas-Partikelemissionen

Die spezifischen Abgas-Partikelemissionen gehen über den gesamten Zeitraum aufgrund der mit der Abgasgesetzgebung verbundenen Verwendung von effizienten Partikelfiltern bei fast allen modernen Fahrzeugkonzepten mit Dieselmotor deutlich zurück. Tabelle 34 zeigt die Entwicklung der spezifischen Emissionen im betrachteten Zeitraum für alle Fahrzeugkategorien.

Tabelle 34: TREMOD-Version 6.0 – Abgas-Partikel-Emissionsfaktoren (in g/km)

Jahr	g/km	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	0,088	0,031	0,136	0,948	0,182	0,675	0,389
1991	0,091	0,031	0,113	0,924	0,200	0,624	0,387
1992	0,089	0,032	0,090	0,911	0,216	0,602	0,388
1993	0,086	0,032	0,093	0,845	0,239	0,571	0,386
1994	0,088	0,032	0,083	0,778	0,266	0,552	0,365
1995	0,086	0,032	0,080	0,717	0,261	0,511	0,349
1996	0,079	0,031	0,079	0,640	0,244	0,435	0,319
1997	0,074	0,030	0,076	0,584	0,233	0,387	0,299
1998	0,069	0,028	0,074	0,534	0,223	0,346	0,283
1999	0,066	0,028	0,074	0,484	0,210	0,309	0,267
2000	0,063	0,028	0,072	0,442	0,200	0,277	0,248
2001	0,059	0,027	0,069	0,407	0,191	0,253	0,250
2002	0,056	0,026	0,070	0,364	0,180	0,230	0,236
2003	0,053	0,025	0,068	0,330	0,168	0,214	0,222
2004	0,051	0,025	0,070	0,309	0,159	0,202	0,215
2005	0,049	0,025	0,071	0,281	0,157	0,191	0,211

Jahr	g/km	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2006	0,046	0,023	0,072	0,250	0,153	0,178	0,202
2007	0,042	0,021	0,073	0,223	0,139	0,156	0,183
2008	0,036	0,018	0,075	0,183	0,121	0,125	0,160
2009	0,031	0,016	0,079	0,169	0,110	0,107	0,150
2010	0,028	0,015	0,078	0,147	0,100	0,093	0,136
2011	0,025	0,013	0,078	0,129	0,089	0,081	0,123
2012	0,022	0,012	0,078	0,099	0,078	0,072	0,113
2013	0,020	0,010	0,079	0,091	0,067	0,065	0,102
2014	0,018	0,009	0,078	0,084	0,057	0,056	0,093
2015	0,016	0,008	0,078	0,079	0,048	0,047	0,083
2016	0,014	0,007	0,077	0,071	0,041	0,040	0,075
2017	0,012	0,006	0,076	0,061	0,035	0,034	0,066
2018	0,011	0,005	0,075	0,051	0,029	0,029	0,059

Quelle: TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

Im Vergleich mit der Version 5.8 liegen alle Emissionsfaktoren nun höher. Tabelle 35 zeigt die Unterschiede.

Tabelle 35: Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 – spezifische Abgas-Partikel-Emissionsfaktoren (Bezug g/km)

Jahr	Mittel	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	45,6%	0,5%	n.a.	48,9%	6,3%	84,4%	101,1%
1991	42,7%	0,0%	n.a.	48,0%	5,4%	80,2%	89,1%
1992	39,8%	2,1%	n.a.	49,7%	3,8%	76,6%	75,4%
1993	36,1%	1,4%	n.a.	45,8%	1,8%	74,4%	79,5%
1994	36,3%	10,8%	-2,9%	56,8%	9,1%	68,1%	51,6%
1995	36,2%	13,0%	-5,3%	52,3%	10,0%	64,7%	49,4%
1996	31,7%	9,4%	-2,6%	51,4%	7,4%	60,7%	44,5%
1997	29,4%	8,3%	-4,8%	49,1%	8,1%	57,7%	41,2%
1998	28,9%	8,4%	-10,0%	48,0%	14,9%	54,8%	42,9%
1999	27,7%	7,4%	-1,6%	47,5%	18,1%	51,3%	40,7%
2000	28,1%	9,6%	27,6%	47,0%	21,5%	47,4%	35,7%
2001	25,3%	7,4%	13,8%	45,6%	24,8%	43,4%	38,2%
2002	26,4%	10,9%	24,8%	45,2%	30,7%	39,7%	37,3%

Jahr	Mittel	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2003	28,7%	14,9%	25,9%	44,5%	39,7%	36,2%	40,9%
2004	27,1%	13,4%	30,7%	44,5%	43,3%	33,0%	41,5%
2005	28,0%	13,4%	37,0%	39,4%	48,5%	33,1%	40,5%
2006	28,5%	14,0%	42,6%	34,1%	51,8%	31,5%	53,9%
2007	29,1%	14,9%	43,5%	30,6%	50,8%	30,6%	48,1%
2008	29,4%	16,1%	54,5%	22,4%	49,2%	29,9%	43,5%
2009	30,3%	17,3%	72,5%	26,8%	46,1%	29,3%	44,6%
2010	30,3%	17,7%	80,6%	20,5%	43,5%	30,3%	40,5%
2011	30,3%	18,1%	86,6%	16,9%	41,1%	32,3%	36,9%
2012	30,2%	18,5%	89,7%	-3,0%	39,9%	33,4%	36,2%
2013	31,1%	18,6%	100,8%	-1,6%	40,2%	34,0%	34,4%
2014	31,9%	18,5%	107,0%	-0,2%	41,5%	34,4%	32,4%
2015	33,5%	17,2%	120,3%	5,0%	43,4%	37,3%	29,3%
2016	34,7%	14,5%	124,2%	3,6%	45,2%	42,7%	32,6%
2017	35,1%	10,7%	133,1%	-0,2%	47,0%	50,6%	31,0%

Quelle: TREMOD 5.82 vom 19.09.2018 und TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

Die Abgas-Partikelemissionen gehen über den gesamten Zeitraum entsprechend den Verbesserungen bei den spezifischen Emissionen zurück. Tabelle 36 zeigt die Entwicklung für den betrachteten Zeitraum für die verschiedenen Fahrzeugkategorien.

Tabelle 36: TREMOD-Version 6.0 –Abgas-Partikel-Emissionen nach Energiebilanz

Jahr	Gesamt (kt)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	51,7	15,9	2,2	4,1	2,7	24,7	2,0
1991	51,7	16,2	1,7	3,5	3,3	25,0	2,0
1992	54,0	16,8	1,2	3,7	3,8	26,3	2,2
1993	55,7	17,4	1,1	3,6	4,7	26,3	2,5
1994	54,4	16,9	0,9	3,1	5,6	25,3	2,5
1995	54,1	17,4	1,0	2,8	6,1	24,3	2,4
1996	49,2	16,7	1,0	2,4	6,1	20,8	2,2
1997	46,6	16,0	1,0	2,2	6,1	19,2	2,1
1998	45,0	15,2	1,0	2,1	6,1	18,5	2,0
1999	44,4	15,3	1,1	2,0	6,2	17,8	2,0
2000	41,9	15,2	1,0	1,8	6,1	16,0	1,8

Jahr	Gesamt (kt)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2001	38,7	14,7	1,0	1,6	6,1	13,6	1,8
2002	36,3	14,4	1,0	1,4	5,9	12,0	1,7
2003	33,1	13,6	0,9	1,2	5,5	10,4	1,5
2004	32,2	13,8	1,0	1,1	5,2	9,6	1,5
2005	30,4	13,0	1,0	1,0	5,2	8,7	1,5
2006	28,5	12,1	1,0	0,9	5,0	8,9	0,6
2007	25,5	10,9	1,0	0,8	4,7	7,7	0,5
2008	21,7	9,4	1,0	0,6	4,1	6,2	0,4
2009	19,2	8,4	1,1	0,6	3,7	5,1	0,4
2010	17,6	7,5	1,0	0,5	3,4	4,8	0,3
2011	16,0	6,9	1,0	0,5	3,1	4,3	0,3
2012	14,2	6,0	0,9	0,4	2,7	4,0	0,3
2013	13,1	5,5	1,0	0,4	2,4	3,6	0,3
2014	11,8	5,1	1,0	0,3	2,1	3,0	0,2
2015	10,6	4,5	1,0	0,3	1,9	2,6	0,2
2016	9,5	4,1	1,0	0,3	1,7	2,2	0,2
2017	8,6	3,7	1,0	0,2	1,5	1,9	0,2
2018	7,4	3,1	1,0	0,2	1,3	1,6	0,1

Quelle: TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

Gegenüber der TREMOD-Version 5.8 sind die Abgas-Partikelemissionen aufgrund der verbesserten Modellierung und neuer Messergebnisse nun höher (Tabelle 37). Anders als bei den Stickstoffoxidemissionen gibt es jedoch insgesamt keine wesentliche Änderung im Entwicklungstrend.

Tabelle 37: Vergleich der TREMOD-Version 6.0 gegenüber TREMOD 5.8 –Abgas-Partikel-Emissionen nach Energiebilanz

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	36,7%	1,5%		24,9%	7,4%	61,6%	96,2%
1991	34,1%	1,0%		33,4%	6,5%	59,5%	81,2%
1992	30,7%	2,8%		29,8%	4,7%	53,2%	68,1%
1993	28,9%	1,8%		31,2%	2,8%	51,4%	79,8%
1994	28,2%	12,4%	-7,9%	30,1%	14,4%	46,1%	43,9%
1995	26,1%	15,2%	-9,3%	17,2%	19,8%	39,5%	39,6%
1996	21,5%	11,0%	-5,0%	11,4%	16,0%	35,4%	34,2%

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1997	18,9%	9,6%	-6,4%	8,0%	14,2%	32,2%	30,9%
1998	18,7%	9,0%	-12,2%	9,3%	18,6%	30,5%	32,6%
1999	17,3%	7,5%	-1,3%	10,3%	21,6%	26,7%	30,2%
2000	16,9%	10,8%	26,5%	9,0%	25,2%	20,3%	19,5%
2001	15,0%	8,0%	9,2%	9,2%	28,5%	17,2%	27,5%
2002	15,8%	11,3%	18,6%	11,4%	31,2%	13,8%	26,8%
2003	17,3%	15,8%	18,7%	11,3%	39,9%	9,0%	29,0%
2004	16,2%	12,7%	19,2%	17,4%	40,9%	8,6%	28,6%
2005	17,3%	12,7%	24,8%	12,7%	46,4%	9,6%	25,1%
2006	17,1%	10,9%	22,7%	10,7%	47,0%	12,8%	18,7%
2007	17,6%	10,5%	44,6%	11,4%	44,9%	13,2%	11,5%
2008	18,3%	11,3%	49,3%	5,1%	46,1%	13,2%	5,4%
2009	19,4%	12,0%	63,6%	11,7%	44,3%	13,3%	3,3%
2010	19,7%	12,1%	65,3%	9,1%	42,4%	15,4%	-2,1%
2011	19,8%	12,4%	61,7%	6,0%	39,3%	17,3%	-4,8%
2012	19,5%	12,7%	58,0%	-13,0%	37,7%	19,6%	-7,8%
2013	20,1%	12,6%	63,1%	-10,0%	38,6%	20,1%	-10,3%
2014	20,8%	12,1%	65,5%	-5,1%	44,4%	19,1%	-11,3%
2015	23,1%	13,4%	85,6%	-2,1%	52,5%	17,7%	-20,4%
2016	23,4%	9,6%	92,0%	-4,3%	61,6%	20,1%	-19,9%
2017	24,1%	6,4%	101,3%	-11,4%	70,0%	25,2%	-26,7%

Quelle: TREMOD 5.82 vom 19.09.2018 und TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

2.3 Schienenverkehr

2.3.1 Abgrenzung Schienenverkehr

Beim Schienenverkehr wird unterschieden in den kommunalen Verkehr mit Straßen-, Stadt- und U-Bahnen, den Eisenbahnverkehr der DB AG, der sonstigen Unternehmen des öffentlichen Verkehrs, und des nichtöffentlichen Verkehrs (Werkverkehr). Weiter wird differenziert in die Verkehrsarten Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr. Fahrzeugtechnisch wird unterschieden nach Diesel- und Elektrotraktion, bis 1993 zusätzlich auch nach Dampftraktion.

Die Berechnung von Energieverbrauch und Emissionen des Schienenverkehrs erfolgt in TREMOD somit bisher auf einer aggregierten Ebene. Allerdings liegen dieser – zumindest beim Verkehr der DB AG – differenzierte Werte (unterschieden nach Zuggattungen, Baureihen und

Motoren) zugrunde, die vom Bahn-Umwelt-Zentrum jährlich aufbereitet, aggregiert und für TREMOD bereitgestellt werden (DB Umwelt 2019).

2.3.2 Berechnungsmethodik

Ausgangspunkt der Emissionsberechnungen in TREMOD sind die Verkehrs- bzw. Transportleistungen und die Betriebsleistungen (Platz-km bzw. angebotene Tonnenkilometer), die über den Auslastungsgrad verknüpft sind. Je Platzkilometer bzw. angebotenen Tonnenkilometer sind spezifische Energieverbrauchskennzahlen und für die Emissionsberechnung energiebezogene Emissionsfaktoren (direkt und Vorkette) hinterlegt. Mit diesen Kennzahlen wird die TREMOD-Berechnung durchgeführt.

Die Kennzahlen werden aus den vorliegenden statistischen Angaben und technischen Kennzahlen der Fahrzeuge für die Realjahre ermittelt. Mit der Ausgangsgröße „Verkehrsleistung“ und der Variationsmöglichkeit aller anderen Parameter ist das Modell szenarienfähig. In den folgenden Abschnitten werden die aufgeführten Kennzahlen für die Realjahre ab dem Jahr 1994 beschrieben.

Der Berechnungsablauf ist im Detail in (Knörr et al. 2016) beschrieben.

2.3.3 Verkehrs- und Betriebsleistungen

Die Verkehrsleistungen des Eisenbahnverkehrs haben seit 1994 zugenommen, vor allem beim Personennahverkehr und beim Güterverkehr. Der Anteil der sonstigen Eisenbahnunternehmen an der Verkehrsleistung ist in den vergangenen Jahren deutlich angestiegen und lag im Jahr 2017 im Personennahverkehr bei 24 % und im Güterverkehr bei 52 %.

Der Anteil der Dieseltraktion an der Betriebsleistung ist bei der DB AG in allen Verkehrsbereichen zurückgegangen: Bei der DB AG lag der Dieselanteil im Jahr 2018 im Personennahverkehr bei 13,2 %, im Personenfernverkehr noch bei 1,8 % und im Güterverkehr (ohne Rangieren) bei 4,3%. Im Jahr 2000 waren es noch 27% (Personennahverkehr), 4,5% (Personenfernverkehr) und 8,2% (Güterverkehr).

Für die sonstigen Eisenbahnen liegen nur sehr unvollständige Daten zu den Betriebsleistungen vor. Für die Aktualisierung konnte eine Abschätzung auf Basis von Trassenkilometern vorgenommen werden, die von DB Umwelt intern zur Verfügung gestellt wurde (DB Umwelt 2019). Danach lag der Anteil der Dieseltraktion der sonstigen Eisenbahnen im Personennahverkehr bei ca. 40 % und im Güterverkehr bei 3,2 %.

Tabelle 38: Verkehrsleistungsentwicklung des Personenverkehrs der Eisenbahnen in Deutschland 1994-2018

in Mrd. Pkm	Personennahverkehr DB	Personennahverkehr NE	Personennahverkehr gesamt	davon mit Diesel	Personenfernverkehr
1994	29,7	0,6	30,3	10,1	34,8
1995	34,1	0,6	34,7	11,0	36,3
1996	35,4	0,7	36,1	11,6	35,6
1997	36,5	0,8	37,2	11,4	35,2
1998	37,3	0,8	38,1	12,7	34,6
1999	37,9	1,0	38,9	11,4	34,9

in Mrd. Pkm	Personennahverkehr DB	Personennahverkehr NE	Personennahverkehr gesamt	davon mit Diesel	Personenfernverkehr
2000	38,2	1,0	39,2	11,0	36,2
2001	39,1	1,3	40,4	10,8	35,3
2002	36,7	1,5	38,2	10,2	32,7
2003	37,9	1,8	39,7	10,2	31,6
2004	37,9	2,6	40,5	10,4	32,3
2005	38,9	4,3	43,2	11,2	33,6
2006	40,3	4,2	44,5	11,3	34,5
2007	40,7	4,3	45,0	11,3	34,1
2008	41,6	5,5	47,1	10,9	35,5
2009	41,0	6,5	47,5	11,0	34,7
2010	41,4	6,6	48,0	10,9	36,0
2011	42,3	7,6	49,9	11,9	35,4
2012	43,4	8,2	51,5	12,3	37,2
2013	43,6	8,4	52,0	11,5	36,6
2014	43,6	9,9	53,5	11,9	35,9
2015	42,6	10,3	52,9	11,4	36,8
2016	40,8	13,6	54,4	11,6	39,3
2017	41,9	13,0	54,9	11,6	40,3
2018	41,9	13,3	55,1	10,8	42,6

Quellen: Verkehr in Zahlen, DB Umwelt, Destatis, VDV, eigene Berechnungen

Nicht dargestellt ist in Tabelle 38 die Verkehrsleistungsentwicklung der ausschließlich elektrisch betriebenen Straßen-, Stadt und U-Bahnen. Deren Verkehrsleistung stieg von 1994 bis 2018 um rund 42 % auf knapp 18 Mrd. Pkm.

Tabelle 39: Verkehrsleistungsentwicklung des Güterverkehrs der Eisenbahnen in Deutschland 1994-2018

in Mrd. tkm	Güterverkehr DB	Güterverkehr NE	Güterverkehr gesamt	davon mit Diesel	Hafen- und Werkbahnen
1994	70,6	0,1	70,7	11,2	5,4
1995	69,5	1,0	70,5	11,3	5,2
1996	67,9	2,1	70,0	12,6	4,8
1997	72,6	1,3	73,9	10,1	4,7
1998	73,3	0,9	74,2	9,3	4,2
1999	75,8	1,0	76,8	7,9	4,0

in Mrd. tkm	Güterverkehr DB	Güterverkehr NE	Güterverkehr gesamt	davon mit Diesel	Hafen- und Werkbahnen
2000	81,2	1,5	82,7	7,9	4,3
2001	78,8	2,2	81,0	7,8	4,2
2002	77,2	3,9	81,1	7,8	3,6
2003	79,2	5,9	85,1	9,0	2,8
2004	83,1	8,8	91,9	10,0	4,4
2005	81,7	13,7	95,4	10,0	5,1
2006	88,4	18,6	107,0	9,9	3,0
2007	91,0	23,7	114,7	9,2	3,2
2008	91,2	24,7	115,8	8,0	3,1
2009	72,3	23,9	96,1	6,1	2,8
2010	80,4	27,5	107,9	5,9	3,0
2011	83,8	30,4	114,2	6,1	3,4
2012	78,5	33,0	111,6	5,6	3,7
2013	75,2	40,1	115,4	5,4	4,1
2014	74,8	42,0	116,9	4,4	4,1
2015	71,0	53,3	124,3	4,3	4,1
2016	68,6	59,7	128,3	4,9	4,7
2017	67,6	62,3	129,9	5,3	4,9
2018	64,2	69,5	133,7	5,0	4,9

Quellen: Verkehr in Zahlen, DB Umwelt, Destatis, VDV, eigene Berechnungen

2.3.4 Energieverbrauch

Der Traktionsenergieverbrauch (das ist der Energieverbrauch für den Fahrbetrieb) der Bahnen ist in den vergangenen Jahren zurückgegangen. Der in der DB-Statistik erfasste Dieserverbrauch der DB AG ging im Betrachtungszeitraum deutlich zurück. Mit den oben beschriebenen Annahmen zur Verkehrs- und Betriebsleistungsentwicklung nahm der Dieserverbrauch der sonstigen Bahnunternehmen zu. Allerdings sind diese Werte nicht statistisch erfasst sondern berechnet.

Der Dieserverbrauch der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AG Energiebilanzen n.d.) weicht von den mit TREMOD berechneten Werten z.T. deutlich ab: Seit 2005 liegt der berechnete Verbrauch höher als der von der AG Energiebilanzen nachgewiesene Wert. Entweder wird somit der Dieserverbrauch der sonstigen Bahnen in TREMOD überschätzt oder bei der AG Energiebilanzen unterschätzt. Nicht plausibel erscheint jedenfalls der starke Rückgang des Verbrauchs bei den AG Energiebilanzen in den Jahren 2017 und 2018. Eine Abstimmung der Werte wird empfohlen.

Tabelle 40: Berechneter Dieselverbrauch der Eisenbahnen in Deutschland im Vergleich mit der Energiebilanz 1994-2018

In PJ	Diesel- verbrauch DB	Diesel- verbrauch NE	Diesel- verbrauch Gesamt	Diesel- verbrauch HWB	Dieserverbrauch Energiebilanz	Differenz Energiebilanz/ Verbrauch berechnet
1994	29,1	0,5	29,6	0,9	31,9	4,7%
1995	28,1	0,9	29,0	0,8	31,1	4,1%
1996	26,7	1,4	28,0	0,8	29,5	2,6%
1997	25,0	1,2	26,1	0,8	27,8	3,4%
1998	23,6	1,0	24,6	0,7	26,5	5,1%
1999	21,8	1,1	22,9	0,6	25,0	6,2%
2000	21,6	1,3	22,9	0,7	25,4	7,8%
2001	20,2	1,8	22,1	0,7	23,5	3,5%
2002	17,0	2,0	19,0	0,6	22,0	12,7%
2003	16,2	2,7	18,8	0,5	21,6	12,0%
2004	15,3	3,4	18,7	0,7	20,5	5,8%
2005	14,0	4,7	18,8	0,8	18,5	-5,3%
2006	13,3	4,5	17,8	0,5	17,6	-3,6%
2007	13,0	4,4	17,4	0,5	17,5	-2,5%
2008	12,8	5,3	18,2	0,5	17,2	-7,9%
2009	11,4	5,6	17,0	0,5	15,3	-12,2%
2010	11,4	5,7	17,2	0,5	15,6	-11,7%
2011	11,1	5,9	17,0	0,6	15,7	-10,4%
2012	10,6	6,2	16,7	0,6	14,4	-17,0%
2013	10,4	6,6	17,0	0,7	14,6	-17,4%
2014	9,5	5,4	14,9	0,7	13,0	-16,2%
2015	8,8	6,3	15,0	0,7	14,0	-10,4%
2016	8,7	6,2	14,9	0,8	14,5	-7,4%
2017	8,9	6,3	15,2	0,8	11,9	-25,2%
2018	8,7	6,4	15,1	0,8	11,6	-27,1%

Quellen: DB Umwelt, AG Energiebilanzen, eigene Berechnungen

Trotz zunehmender Verkehrsleistungen blieb der Stromverbrauch für den Fahrbetrieb annähernd gleich. Der Stromverbrauch des Schienenverkehrs liegt bei der AG Energiebilanzen bis 2011 deutlich höher als über andere Statistiken nachweisbar ist. Es besteht die Vermutung, dass die AG Energiebilanzen auch andere, nicht traktionsbedingte und nicht zum

Schienenverkehr gehörende Energieverbräuche erfasst. 2013 wurden die Werte ab 2012 revidiert und um ca. ein Viertel gegenüber den Vorjahren abgesenkt. Die Werte liegen damit auf dem Niveau der TREMOD-Ergebnisse. Eine Begründung für die Absenkung liefert die AG Energielizenzen nicht.

2.3.5 Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren der Dieseltraktion werden von der DB AG motorenfein entsprechend ihrer Anteile an der Betriebsleistung im Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr sowie für Rangieren abgeleitet. Das grundsätzliche Verfahren wurde im Rahmen einer Studie des Umweltbundesamtes zusammen mit ifeu entwickelt (IFEU 2003). Grundlage sind die Emissionsfaktoren der Motoren im ISO-F-Zyklus. Ergebnis der jährlichen Aufbereitung sind kraftstoffbezogene Emissionsfaktoren für Stickstoffoxid, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Partikel in g/kg, jeweils für Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr sowie Rangieren.

Da für die übrigen Bahnen keine Informationen zum Emissionsverhalten vorliegen, werden die Werte der DB AG auch für die übrigen Bahnen verwendet.

Tabelle 41: Emissionsfaktoren des dieselbetriebenen Schienenverkehrs (in g/kg) für ausgewählte Jahre

Komp.	Zugart	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018
CO	Rangieren	18,0	15,4	9,0	5,6	4,3	4,0	3,9	3,9
	GV	11,5	9,4	9,7	9,8	5,4	5,5	5,2	5,3
	PFV	14,1	11,0	9,4	6,5	6,7	6,2	6,3	5,2
	PNV	10,6	10,0	5,1	3,9	3,7	3,6	3,7	3,5
HC	Rangieren	2,9	3,0	2,1	2,3	1,7	1,7	1,7	1,8
	GV	11,5	9,4	9,7	9,8	5,4	5,5	5,2	5,3
	PFV	14,1	11,0	9,4	6,5	6,7	6,2	6,3	5,2
	PNV	10,6	10,0	5,1	3,9	3,7	3,6	3,7	3,5
NO _x	Rangieren	49,4	45,7	38,5	39,0	34,0	33,6	33,1	33,1
	GV	50,5	54,8	53,9	51,5	35,1	35,3	33,8	33,6
	PFV	60,0	57,7	53,3	48,4	49,7	46,3	45,9	40,1
	PNV	49,2	51,5	45,7	39,4	34,9	33,6	32,5	31,2
Part	Rangieren	1,9	1,7	1,5	1,0	0,6	0,6	0,5	0,5
	GV	1,9	1,9	1,6	1,3	0,6	0,6	0,5	0,6
	PFV	1,8	1,5	0,9	0,6	0,5	0,5	0,5	0,3
	PNV	1,8	1,4	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5

Quelle: DB Umwelt

2.4 Binnenschifffahrt

2.4.1 Abgrenzung und Berechnungsmethodik Binnenschifffahrt

Der Energieverbrauch und die Emissionen der Binnenschifffahrt werden ab dem Bezugsjahr 2010 aufgrund der seit diesem Jahr vorliegenden Binnenschiffsstatistik sehr differenziert berechnet. Details hierzu sind in (ifeu 2016) und (Knörr et al. 2013) beschrieben. Weitere Aktualisierungen betreffen die spezifischen Energieverbräuche und Emissionsfaktoren aus Basis neuerer Erkenntnisse aus Messungen im Realbetrieb (siehe Anhang E für weitere Erläuterungen). Die Ergebnisse für die Bezugsjahre ab 2010 wurden daher rückwirkend aktualisiert.

2.4.2 Verkehrsleistungen

Die Verkehrsleistungen der Binnenschifffahrt sind zwischen 1994 und 2017 nahezu konstant geblieben mit Schwankungen zwischen 55 und 65 Mrd. tkm. 2018 zeigt sich auf Grund von Niedrigwasserständen im 2. Halbjahr ein deutlicher Rückgang auf 46,9 Mrd. tkm (DESTATIS 2019b).

2.4.3 Energieverbrauch

Der Energieverbrauch (Diesel inkl. Biodiesel) ging von 26,1 PJ im Jahr 1994 bis auf 16,9 PJ im Jahr 2018 zurück. Der mittlere spezifische Energieverbrauch lag 2018 bei 0,36 MJ pro tkm, der höchste Wert seit 2011. Er wird von verschiedenen Faktoren wie den befahrenen Wasserstraßen, der Zusammensetzung der Schiffsflotte und deren Auslastung bestimmt.

Tabelle 42: Verkehrsleistung und Energieverbrauch der Binnenschifffahrt 1994-2018

	Verkehrsleistung (Mrd. tkm)	Verbrauch (PJ)	spez. Verbrauch (MJ/tkm)	Diesel- verbrauch Energiebilanz	Differenz Energiebilanz/ Verbrauch berechnet
1994	61,8	26,1	0,42	29,8	14%
1995	64	26,8	0,42	23,6	-12%
1996	61,3	25,4	0,41	21,6	-15%
1997	62,2	25,5	0,41	17,1	-33%
1998	64,3	26,1	0,41	15,7	-40%
1999	62,7	25,3	0,40	12,8	-49%
2000	66,5	26,5	0,40	11,9	-55%
2001	64,8	25,5	0,39	11,4	-55%
2002	64,2	24,9	0,39	10	-60%
2003	58,2	22,3	0,38	10,4	-53%
2004	63,7	24,0	0,38	11,7	-51%
2005	64,1	23,8	0,37	13,1	-45%
2006	64,0	23,4	0,37	11,5	-51%

	Verkehrsleistung (Mrd. tkm)	Verbrauch (PJ)	spez. Verbrauch (MJ/tkm)	Diesel- verbrauch Energiebilanz	Differenz Energiebilanz/ Verbrauch berechnet
2007	64,7	23,3	0,36	11,7	-50%
2008	64,1	22,7	0,36	10,7	-53%
2009	55,5	19,4	0,35	11,9	-39%
2010	62,3	21,4	0,34	11,9	-44%
2011	55,0	20,4	0,37	12,8	-37%
2012	58,5	19,7	0,34	12,1	-38%
2013	60,1	19,9	0,33	12,3	-38%
2014	59,1	19,9	0,34	12,8	-36%
2015	55,3	19,5	0,35	14	-28%
2016	54,3	18,4	0,34	11,7	-36%
2017	55,5	19,2	0,35	10,7	-44%
2018	46,9	16,9	0,36	9,9	-41%

Anmerkungen: Ab 2010 differenzierte Datengrundlagen des Statistischen Bundesamtes. Anmerkung zum Energieverbrauch: Umfasst Güter-Binnenschifffahrt auf allen deutschen Wasserstraßen, Basis: ifeu-Berechnungen.

2.4.4 Emissionsfaktoren

Für die regulierten Schadstoffe CO, HC, NO_x und PM wurden in (Knörr et al. 2013) Emissionsfaktoren und -messdaten für Binnenschiffsmotoren verschiedener Baujahrklassen von <1970 bis 2011 ausgewertet sowie Annahmen aus den aktuell geltenden Emissionsgrenzwerten getroffen. Zusätzlich werden seit der Version TREMOD 6.03 Korrekturfaktoren in Abhängigkeit der mittleren Motorlast angewendet, um das Emissionsverhalten im realen Betrieb besser abzubilden (siehe Anhang E). Die Emissionsfaktoren pro Baujahrklasse werden über die jeweilige Altersstruktur der eingesetzten Motoren der niederländischen und deutschen Schiffsflotte für verschiedene Tragfähigkeitsklassen den jährlichen Verkehrsleistungen der Binnenschifffahrt in Deutschland zugeordnet.

Keine spezifischen Informationen für Binnenschiffe liegen vor für Distickstoffoxid und Ammoniak. Für diese Komponenten werden die Emissionsfaktoren konventioneller schwerer Nutzfahrzeuge, umgerechnet auf energiebezogene Werte, verwendet (siehe Kapitel „Konventionen und wichtige Kennzahlen“). Für die differenzierten Kohlenwasserstoffe (Benzol, Methan, Xylol und Toluol) werden die Anteilswerte an den HC-Emissionen der konventionellen schweren Nutzfahrzeuge des Straßenverkehrs verwendet, siehe (Heidt et al. 2016).

Tabelle 43: Mittlere Emissionsfaktoren der Binnenschifffahrt (in g/kg) für ausgewählte Jahre

Schadstoff	1994	2000	2005	2010	2015	2018
CO	16,9	14,5	13,2	11,8	10,6	10,0
HC	3,9	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6
NO _x	57,1	57,4	55,6	53,4	50,5	48,7

Schadstoff	1994	2000	2005	2010	2015	2018
PM	2,3	2,0	1,7	1,4	1,2	1,2
CH4	0,094	0,082	0,078	0,073	0,066	0,063
N2O	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043
NH3	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
BC	1,126	0,979	0,859	0,722	0,662	0,638
SO2	2,600	2,600	5,200	4,212	0,032	0,032
Benzol	0,075	0,065	0,061	0,058	0,052	0,050
Toluol	0,031	0,027	0,026	0,024	0,022	0,021
Xylol	0,031	0,027	0,026	0,024	0,022	0,021

Quelle: (ifeu, 2016; ifeu / INFRAS, 2013); eigene Berechnungen

2.5 Flugverkehr

2.5.1 Übersicht

Der Flugverkehr wird nach dem Standortprinzip berechnet: Erfasst wird die Verkehrsleistung der von deutschen Verkehrsflughäfen abgehenden Flüge bis zur ersten (Zwischen-)landung.

In TREMOD wird der Flugverkehr unterschieden in den nationalen Flugverkehr (Verkehr zwischen inländischen Verkehrsflughäfen) und dem internationalen Flugverkehr, der die abgehenden grenz-überschreitenden Flüge beinhaltet. Weiter wird differenziert in Personen- und Güterverkehr.

Im Rahmen der TREMOD-Aktualisierung werden neben der Aktualisierung der Verkehrsmengen auf das Jahr 2018 zudem die flugzeugspezifischen Emissionsfaktoren überarbeitet.

2.5.2 Berechnungsmethodik

2.5.2.1 Bottom up Berechnung

Die Berechnung der Flugverkehrsemissionen erfolgt in TREMOD differenziert nach Flugzeugtypen, Entfernungsklassen und Flugphasen (LTO und Reiseflug CCD). Hierzu werden beim Statistischen Bundesamt im Rahmen einer Sonderauswertung für die Zeitreihe ab 1990 kontinuierlich die Starts, die zurückgelegten Entfernungen, die Anzahl Personen sowie das Fracht- und Postaufkommen (in Tonnen) für den gewerblichen Flugverkehr auf ausgewählten Flugplätzen (Hauptverkehrsflughäfen) abgefragt. Ein Hauptverkehrsflughafen wird dabei durch eine Abfertigung von mehr als 150.000 Passagiereinheiten (1 Passagier bzw. 100 kg Fracht bzw. Post) definiert, siehe (Destatis 2019). In der Aktualisierung werden somit noch 24 Flughäfen abgedeckt (zuletzt 27). Daraus lassen sich über die Zuordnung nach Entfernungsklassen die Flugzeugkilometer sowie die Personen- und Tonnenkilometer berechnen.

Für den gewerblichen Verkehr auf sonstigen Flugplätzen (weniger als 150.000 Passagiereinheiten) und den nicht-gewerblichen Flugverkehr liegen keine differenzierten Daten vor. Hier erfolgten Abschätzungen aufgrund der vom Statistischen Bundesamt ausgewiesenen

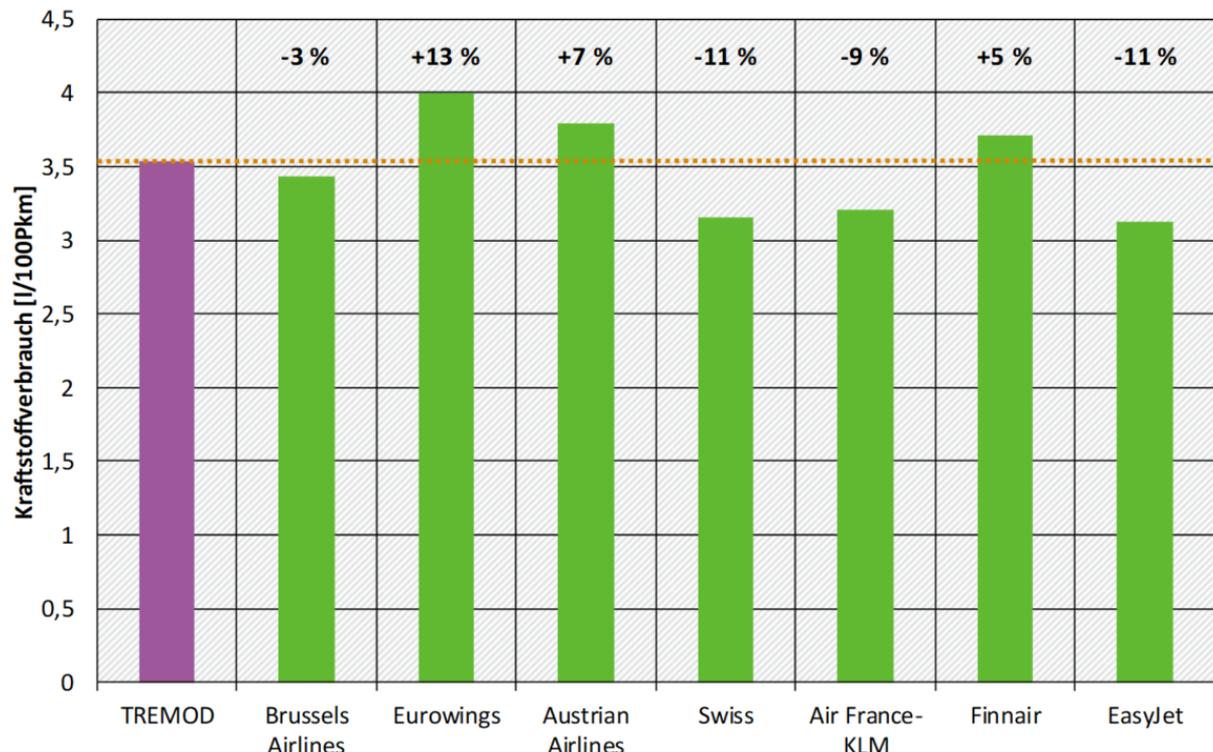
Flugbewegungen, die Informationen über die Anzahl Starts differenziert nach Flugzeuggrößenklassen enthalten. Im Rahmen der Aktualisierung wurde dieser sonstige Flugverkehr grundlegend angepasst. Das geänderte Vorgehen ist in Abschnitt D.4 erläutert.

Der spezifische Energieverbrauch und die verfügbaren Emissionsfaktoren für jede Flugphase und Distanzklasse werden mit der Aktualisierung typenfein dem „EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook – 2016“ bzw. dem dazugehörigen Berechnungstool „Master emission calculator 2016“ entnommen (European Environment Agency 2017). Nicht vorhandene Kennzahlen (wie bspw. das maximal zulässige Startgewicht; kurz MTOW) werden durch andere Quellen ergänzt. Im Fall von Datenlücken im Bereich der flugzeugspezifischen Emissionsfaktoren und Verbräuchen werden Abschätzungen getroffen. Das aktualisierte Vorgehen zum Lückenschluss wird in Abschnitt D.2 beschrieben.

Die Zuordnung von Energieverbrauch und Emissionen auf Personen- und Güterverkehr muss bei Passagierflügen mit Beifracht erfolgt entsprechend der Monitoring-Richtlinie 2009/339/EC. Dabei werden die Personenkilometer über ein Gewicht je Person von 100 kg in Tonnenkilometer umgerechnet. Die Aufteilung erfolgt entsprechend der so berechneten Gewichtsanteile für Personen und Beifracht.

Die nach diesem Verfahren berechneten spezifischen Energieverbrauchswerte je Personen- bzw. Tonnenkilometer passen gut zu anderen Angaben, so z.B. Verbrauchsangaben der Lufthansa Group, Air France-KLM, Finnair oder EasyJet für das Jahr 2018; siehe Abbildung 1.

Abbildung 1: Vergleich des in TREMOD ermittelten Kraftstoffverbrauchs im Flugverkehr mit den Angaben von Fluggesellschaften für das Jahr 2018



Anmerkung: die Werte können durchaus voneinander abweichen, da Einflussgrößen wie die durchschnittlichen Flugdistanzen, eingesetzte Flugzeugtypen und Auslastungen, Auswirkungen auf den spezifischen Verbrauch aufweisen und unterschiedlich sein können. Es wird eine Dichte von 0,8 kg/l angesetzt; Quellen: (Lufthansa Group 2019), (Blue Swan Daily 2019), (Finnair 2018), (easyJet 2019)

2.5.2.2 Top-Down Abgleich für die Emissionsberichterstattung

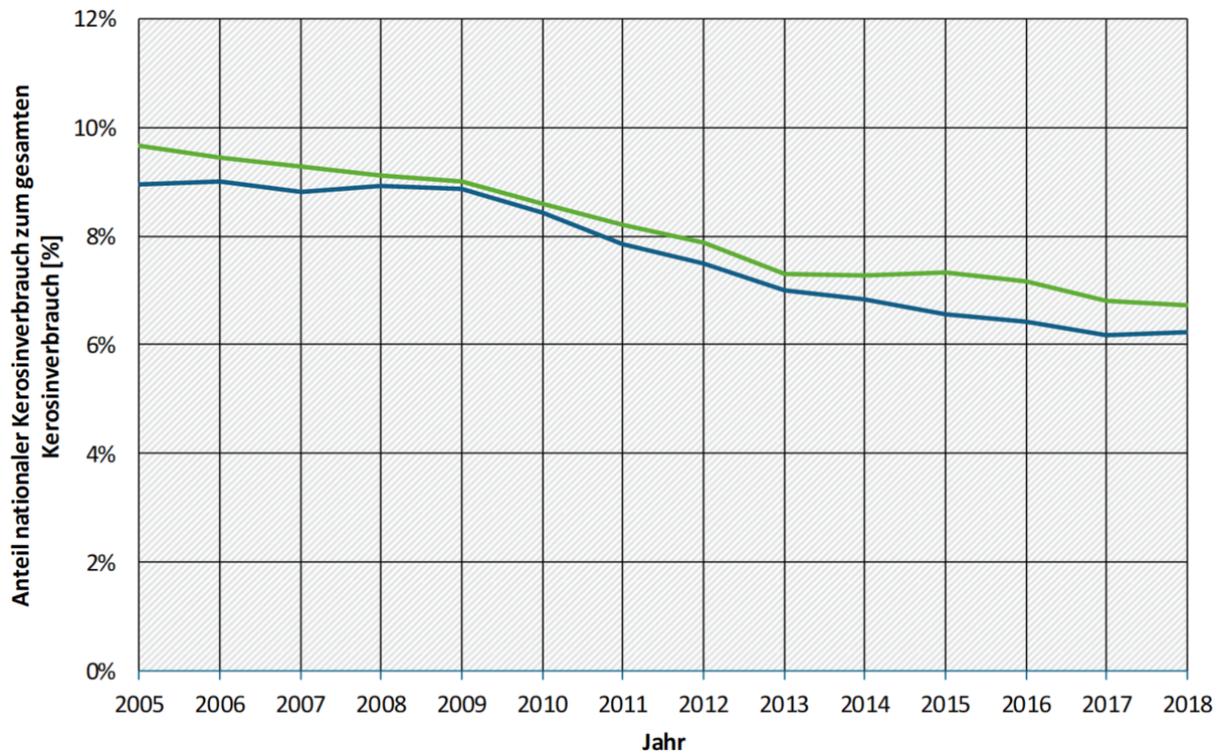
Grundlagen und Rahmen für das Emissionsinventar im Nationalen Inventarbericht ist die nationale Energiebilanz. Daher muss für diesen Zweck der bottom-up berechnete Energiebedarf wie folgt auf die Energiebilanz angepasst werden:

- ▶ Grundlage für den Gesamtverbrauch ist der Inlandsabsatz nach Energiebilanz.
- ▶ Die Aufteilung des gesamten Energieeinsatzes auf nationalen und internationalen Flugverkehr wird entsprechend den ermittelten Anteilen aus den TREMOD-Ergebnissen vorgenommen. Der Energieeinsatz des nationalen Verkehrs wird direkt aus TREMOD übernommen. Die Differenz der Energiebilanz zum errechneten Energieeinsatz des nationalen Verkehrs wird zur Korrektur des Energieeinsatzes des internationalen Verkehrs verwendet. Bestätigt wird dieses Vorgehen durch sehr ähnliche Splitfaktoren (Anteil des nationalen Flugverkehrs am gesamten abgehenden Flugverkehr) nach den Berechnungen durch TREMOD und den Modellierungsergebnissen von Eurocontrol (siehe Abbildung 2).
- ▶ Da sich beim gesamten Flugverkehr eine Differenz zwischen dem in TREMOD berechneten Verbrauch und der Energiebilanz ergibt, wird der berechnete Verbrauch des Reiseflugs der internationalen Flüge so korrigiert, dass sich für jedes Jahr der Gesamtverbrauch nach Energiebilanz ergibt. Der LTO-Verbrauch wird nicht angepasst. Die folgende Gleichung beschreibt das Vorgehen zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs (V) des internationalen Verkehrs in der CCD-Phase, wobei sich die Verbräuche des nationalen Verkehrs und des internationalen Verkehrs in der LTO-Phase direkt aus TREMOD ergeben:

$$V_{CCD,international} = V_{Energiebilanz} - V_{national} - V_{LTO,international}$$

- ▶ Die für die Berichterstattung ausgewiesenen Emissionen errechnen sich direkt aus den Inlandsablieferungen gemäß Energiebilanz und entsprechende kraftstoffspezifische Emissionsfaktoren. Diese Emissionsfaktoren ergeben sich aus TREMOD und berechnen sich aus dem Verhältnis der jeweiligen Gesamtemission zum Kraftstoffverbrauch (beide werden bottom-up in TREMOD ermittelt).

Abbildung 2: Vergleich der Anteile des Kerosinverbrauchs des nationalen Flugverkehrs am Gesamtkerosinverbrauch nach TREMOD und Eurocontrol



Anmerkung: Anteil aus TREMOD ist über die Modellrechnungen ermittelt, also ohne Anpassung an die Energiebilanz.

Quellen: Eurocontrol und eigene Berechnung (mit TREMOD)

2.5.3 Verkehrs- und Betriebsleistungen

Die Verkehrsleistung des Flugverkehrs auf den ausgewählten Flughäfen ist in der Vergangenheit stark angestiegen. Die Personenverkehrsleistung hat sich dabei zwischen 1990 und 2018 mehr als verdreifacht, die Güterverkehrsleistung vervierfacht.

Seit 1990 haben sich sowohl die zurückgelegte Strecke als auch die Kapazität der Flugzeuge deutlich erhöht. Des Weiteren kam es bei den Starts im gewerblichen Flugverkehr (auf den ausgewählten Flughäfen) zwischen 1990 und 2018 zu einem Anstieg von 86 %. Im selben Zeitraum kam es so zu einem Anstieg der Flugzeugkilometer in Höhe von 177 %. Die durchschnittliche Reisedistanz von in Deutschland abgehenden Flügen (nationale und internationale) im Personenverkehr erhöhte sich im selben Zeitraum von 944 km auf 1.410 km. Dies ist insbesondere auf den überproportional starken Anstieg des internationalen Flugverkehrs zurückzuführen, der eine höhere mittlere Reisedistanz aufweist als der nationale Flugverkehr.

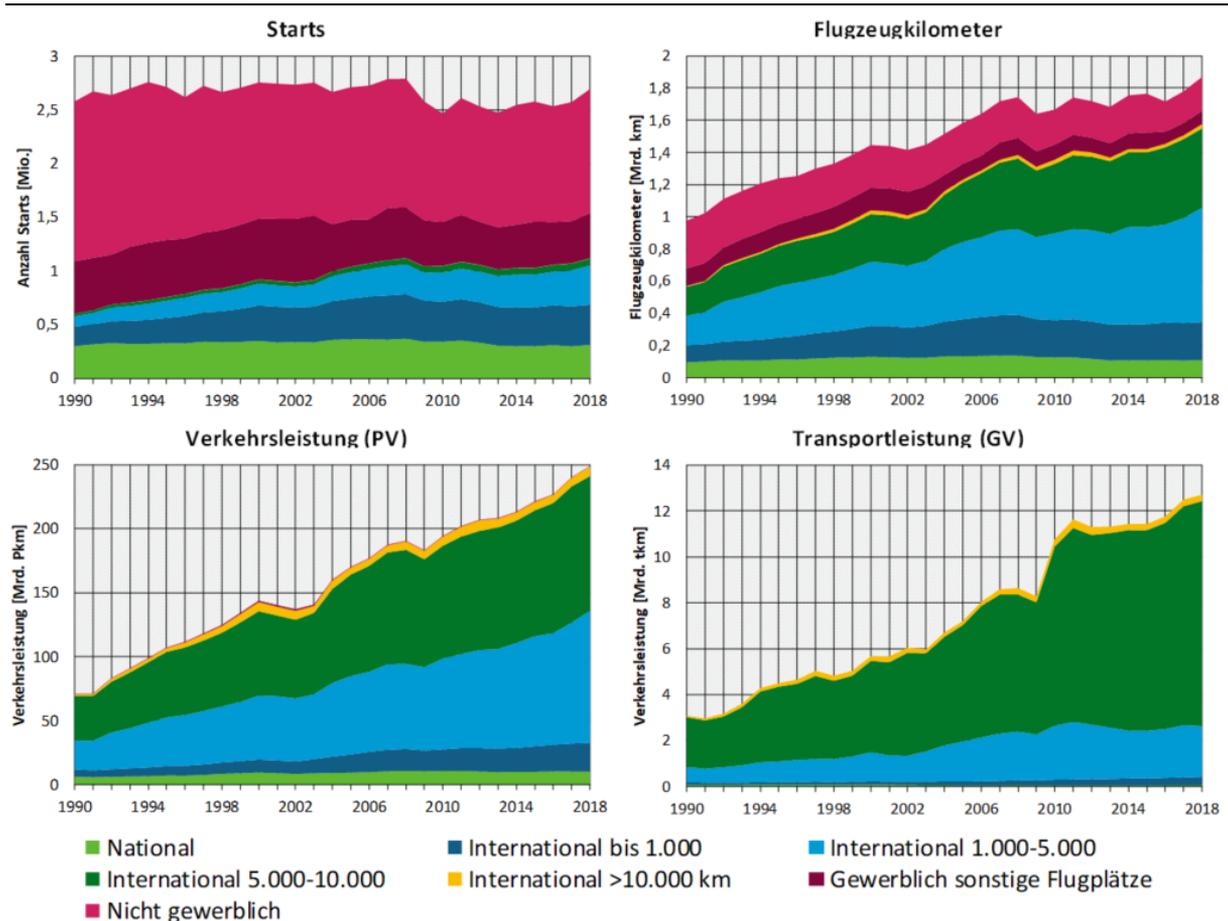
Am geringsten waren beim gewerblichen Flugverkehr auf den ausgewählten Flughäfen die Zuwachsraten im nationalen Flugverkehr. Der Anteil des nationalen Flugverkehrs hat sich dadurch im betrachteten Zeitraum verringert: Bei den Starts sank der Anteil von 50 % im Jahr 1990 auf 28 % im Jahr 2018. Deutlich niedriger ist sein Anteil an den Flugzeugkilometern (7 % im Jahr 2018), respektive bei den Personenkilometern (4 %) und Tonnenkilometern (0,4 %).

Beträchtliche Anteile an den Starts haben der gewerbliche Flugverkehr auf sonstigen Flugplätzen sowie der nicht-gewerbliche Flugverkehr. Die Flugzeugkilometer und die Verkehrsleistung des sonstigen Flugverkehrs liegen nicht vor und werden geschätzt. Die

Methode zur Abschätzung dieser Größen wurde in der vorliegenden Aktualisierung grundlegend angepasst. Das neue Vorgehen wird im Abschnitt D.4 erläutert.

Da auf den sonstigen Flugplätzen überwiegend kleine Maschinen verkehren, haben die Vereinfachungen und Annahmen, die beim Flugverkehr auf den sonstigen Flugplätzen getroffen werden – trotz der hohen Anzahl an Starts – einen vernachlässigbaren Einfluss auf die gesamten Energiemengen und Emissionen des Flugverkehrs. So beträgt bspw. der Anteil des LTO-Energiebedarfs auf den sonstigen Flugplätzen am gesamten LTO-Energiebedarf in Deutschland lediglich ca. 1 %. Abbildung 3 veranschaulicht die relevanten Verkehrskennzahlen zwischen 1990 und 2018.

Abbildung 3: Entwicklung der Starts, Flugzeugkilometer und Verkehrsleistungen des Flugverkehrs in Deutschland 1990-2018



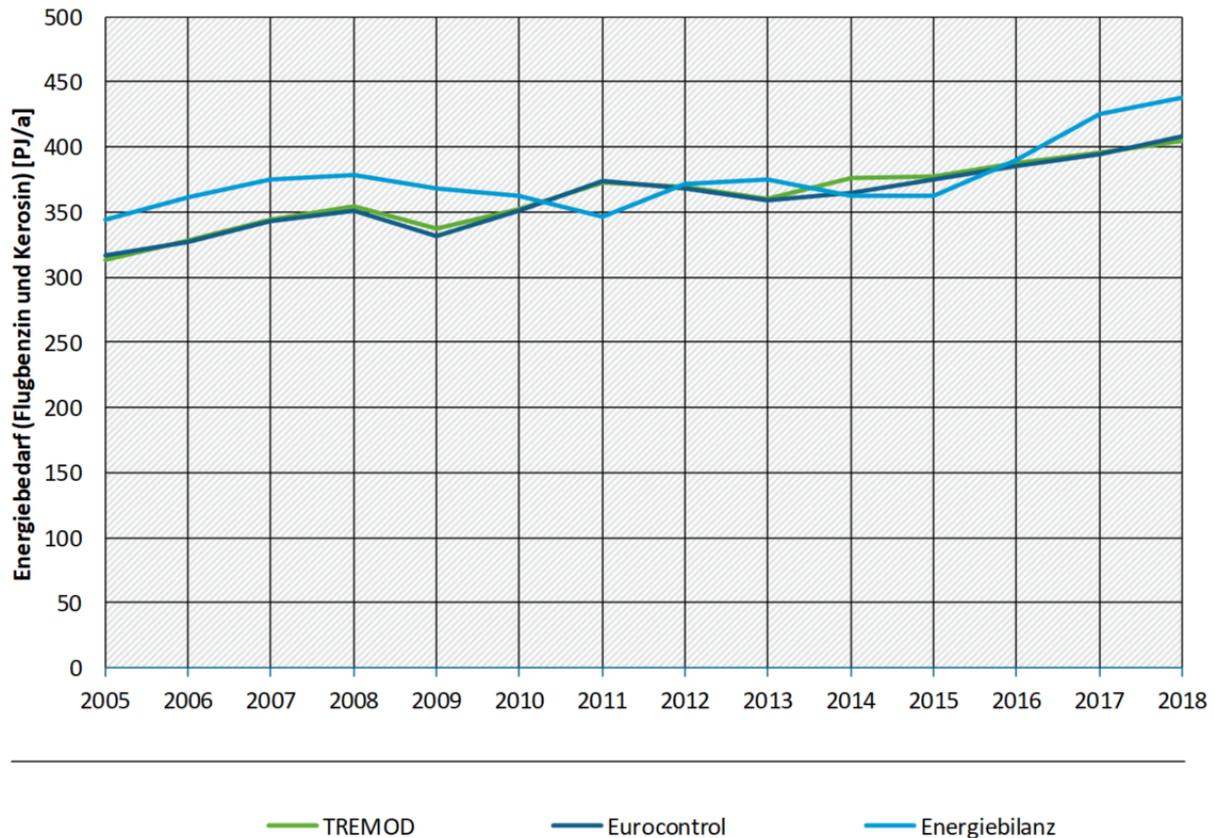
Anmerkungen zur Datenbasis: Anzahl Starts und Aufkommen für den gewerblichen Flugverkehr auf ausgewählten Flugplätzen ist differenziert nach national/international und nach Distanzklassen gegeben. Hieraus können die Flugzeugkilometer und Verkehrsleistung für den gewerblichen Verkehr auf ausgewählten Flugplätzen direkt errechnet werden. Die Anzahl Starts für den gewerblichen Flugverkehr auf sonstigen Flugplätzen und den nicht gewerblichen Flugverkehr sind ebenfalls gegeben. Für diese beiden Kategorien (sonstige Flugplätze und nicht gewerblicher Verkehr) werden die Flugzeugkilometer sowie die Verkehrsleistungen abgeschätzt; Quelle: Destatis – Datenabfrage ergänzt mit eigenen Annahmen

2.5.4 Kraftstoffverbrauch

Da ein Großteil der Emissions- und Verbrauchsfaktoren auf derselben Datenbasis beruhen, stimmen die in TREMOD errechneten Werte wie erwartet gut mit den Ergebnissen von Eurocontrol überein (siehe Abbildung 4). Ursächlich für die geringen Unterschiede sind die detailliertere Modellierung bezüglich der zurückgelegten Distanzen und Flugverläufe bei

Eurocontrol sowie die Nutzung von Informationen zu den eingesetzten Triebwerken pro Flug. Demgegenüber bleibt die Annahme, dass jedem Flugzeugtyp jeweils nur ein Triebwerkstyp zugeteilt ist, in TREMOD weiterhin bestehen. Diese Vereinfachung wird eingehend in Abschnitt D.2 erläutert.

Abbildung 4: Jährlicher Energiebedarf (Flugbenzin und Kerosin) des Flugverkehrs in Deutschland nach TREMOD, Eurocontrol und Energiebilanz

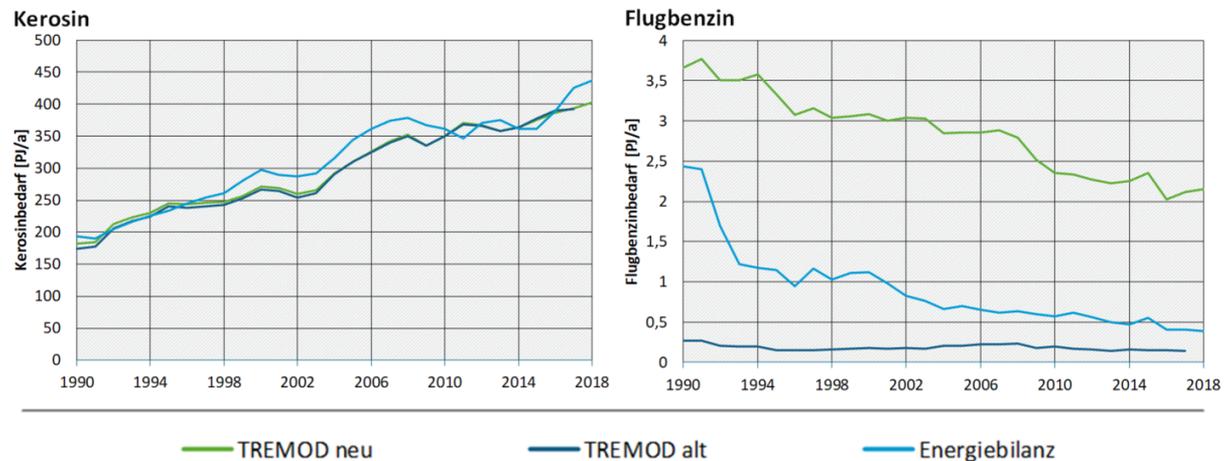


Quellen:(AG Energiebilanzen n.d.), Eurocontrol und eigene Berechnungen (mit TREMOD)

Bezüglich des Kerosinverbrauchs ergeben sich aus der Aktualisierung gegenüber der vorherigen TREMOD-Version vernachlässigbare Unterschiede in der Zeitreihe. Da es bei Flugzeugtypen mit einer hohen Verkehrsleistung keine umfassenden Anpassungen der Verbrauchsdaten gab, sind beim Kerosinverbrauch keine Unterschiede erkennbar. Der sonstige Flugverkehr (gewerblicher Flugverkehr auf sonstigen Flugplätzen und der nichtgewerbliche Verkehr) hat nur einen geringen Anteil am gesamten Energiebedarf.

Anders sieht es beim Verbrauch von Flugbenzin aus. Dieser Kraftstoff wird vornehmlich von kleinen Flugzeugen verbraucht, die von Flugplätzen mit geringem Aufkommen verkehren. Hier gab es grundlegende Anpassungen des Flugverkehrs auf den sonstigen Flugplätzen und des nicht gewerblichen Flugverkehrs bzgl. der Flugzeugkilometer sowie den Emissionsfaktoren, die zu deutlichen Unterschieden zwischen den TREMOD-Versionen führen. Der Flugbenzinbedarf ist durch die Aktualisierung nun deutlich höher (siehe Abbildung 5). Beide Werte weisen jedoch eine große Differenz zur Energiebilanz auf.

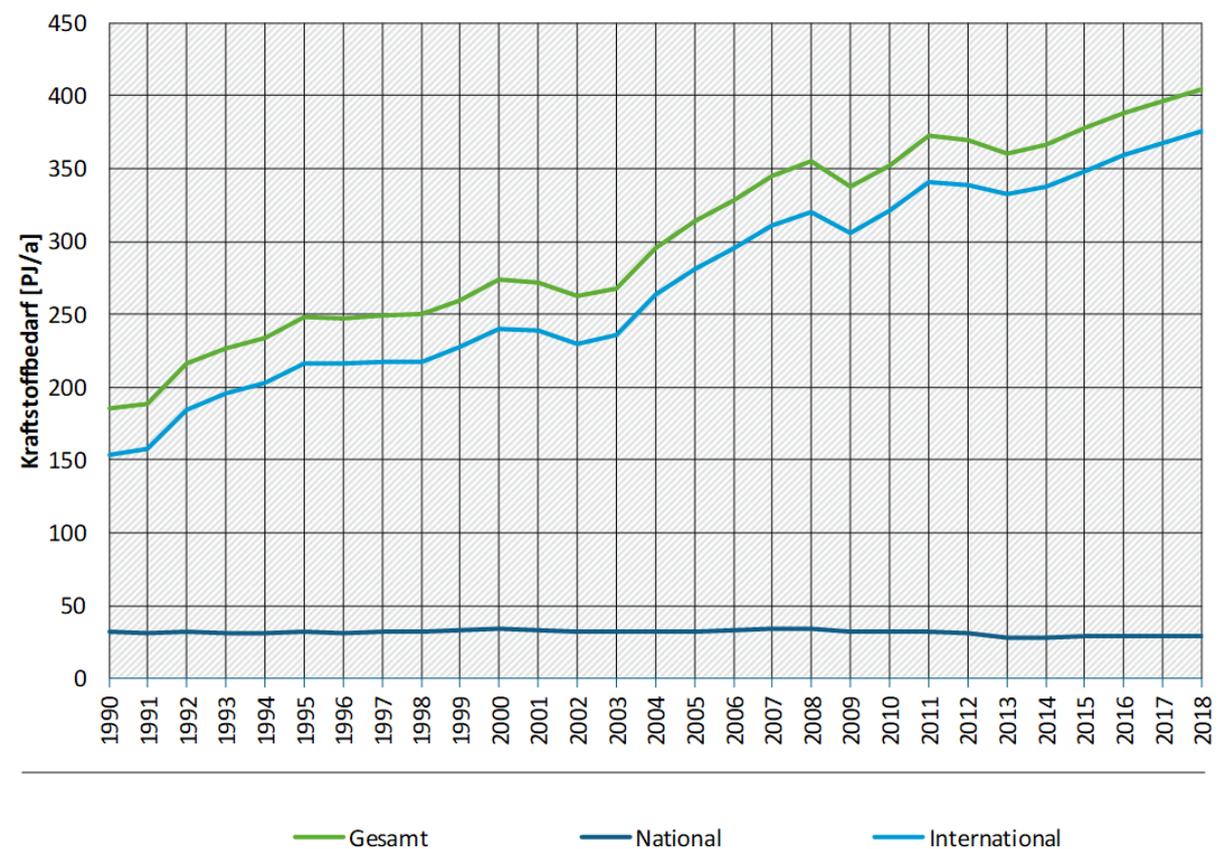
Abbildung 5: Verbräuche von Kerosin und Flugbenzin – Abgleich der Werte von TREMOD vor und nach der Aktualisierung und der Energiebilanz



Quellen:(AG Energiebilanzen n.d.) und eigene Berechnung (mit TREMOD)

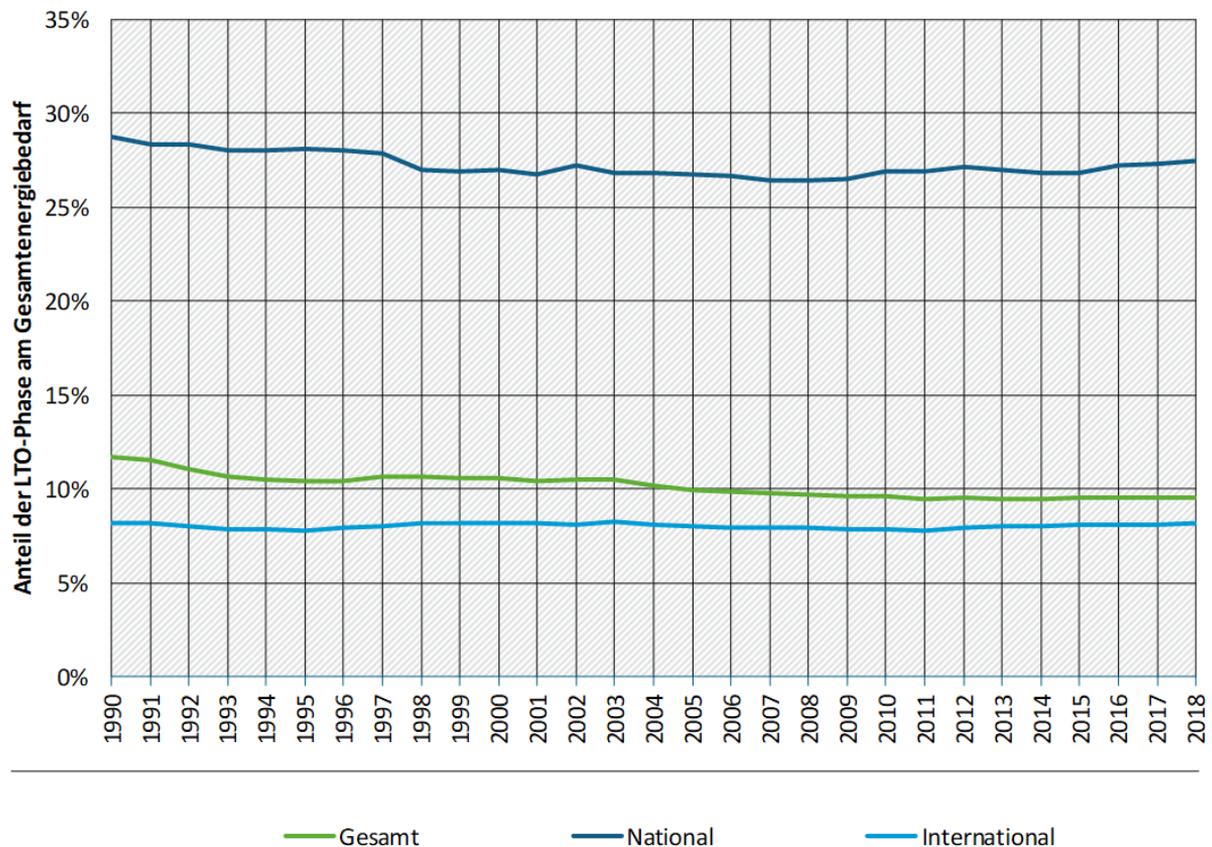
Der Energiebedarf des gesamten Flugverkehrs ist zwischen 1990 und 2018 um 118 % gestiegen. Dabei ging der Anteil des nationalen Flugverkehrs (nach der TREMOD Berechnung) von 17 % im Jahr 1990 auf 7 % im Jahr 2018 zurück (siehe Abbildung 6). Die Start- und Landephase (LTO) hat im Mittel einen Anteil von 10 %, bei den nationalen Flügen (überwiegend Kurzstrecken) liegt dieser Anteil deutlich höher bei 27 % (siehe Abbildung 7). Der mittlere Anteil des LTO ging über die Zeitreihe zurück, da die durchschnittliche Reisedistanz stieg.

Abbildung 6: Kraftstoffverbrauch für den nationalen, internationalen und gesamten Flugverkehr



Quelle: eigene Berechnung (mit TREMOD)

Abbildung 7: Anteil der LTO-Phase am Kraftstoffverbrauch

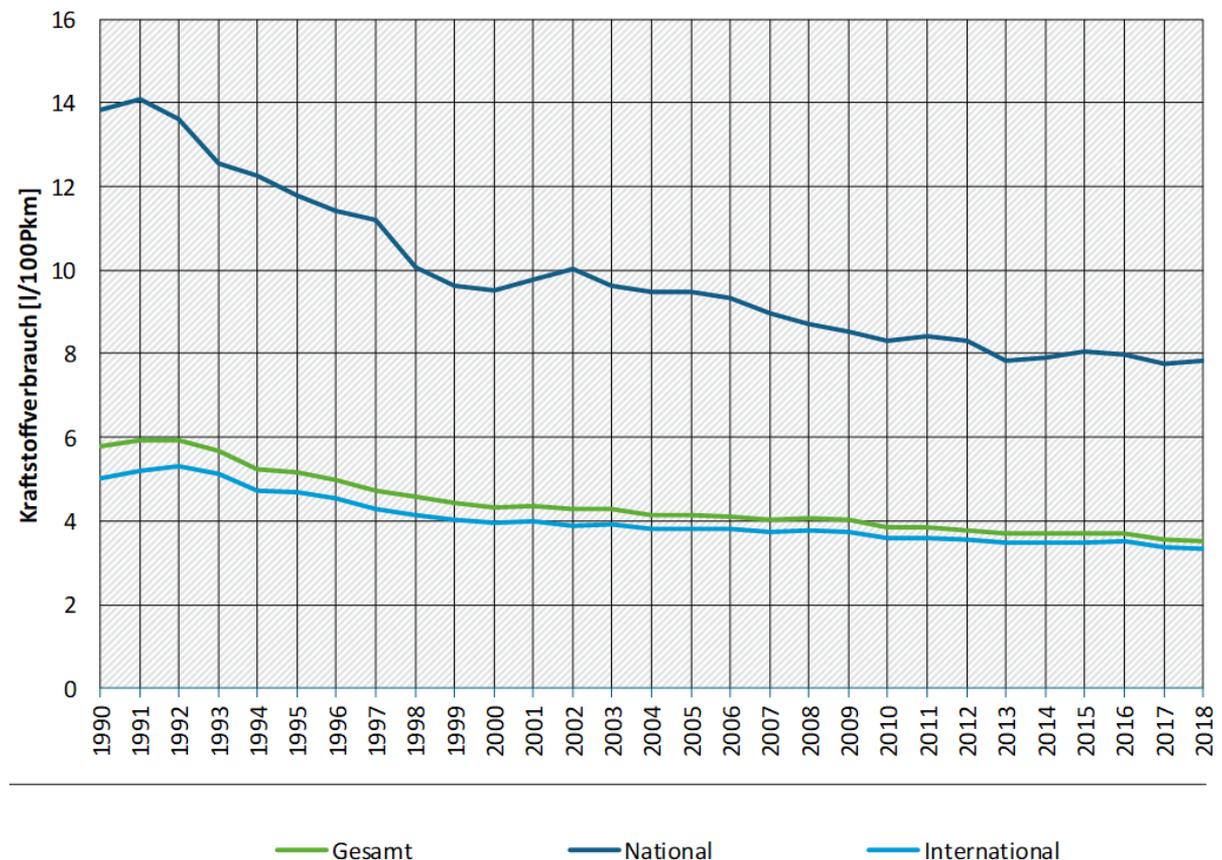


Quelle: eigene Berechnung (mit TREMOD)

Setzt man den Energiebedarf in Beziehung zu den Verkehrsleistungen zeigt sich ein zum Teil deutlicher Rückgang, der von etwa -43 % bei nationalen Flügen bis zu -33 % bei internationalen Flügen zwischen 1990 und 2018 reicht. Dieser Unterschied ist insbesondere auf den höheren Anstieg des Auslastungsgrads bei Kurzstreckenflügen zurückzuführen.

Trotz höherer Minderungsraten ist der spezifische Verbrauch des nationalen Flugverkehrs im Jahr 2018 deutlich höher als der spezifische Verbrauch beim internationalen Verkehr. Dies liegt vor allem daran, dass der Anteil der Startphase beim nationalen Verkehr hoch ist, aber auch daran, dass im Kurzstreckenverkehr eher kleinere Flugzeuge mit geringerer Kapazität verwendet werden. Abbildung 8 zeigt die spezifischen Kraftstoffverbräuche pro Personenkilometer.

Abbildung 8: Kraftstoffverbrauch pro Personenkilometer im nationalen und internationalen Flugverkehr

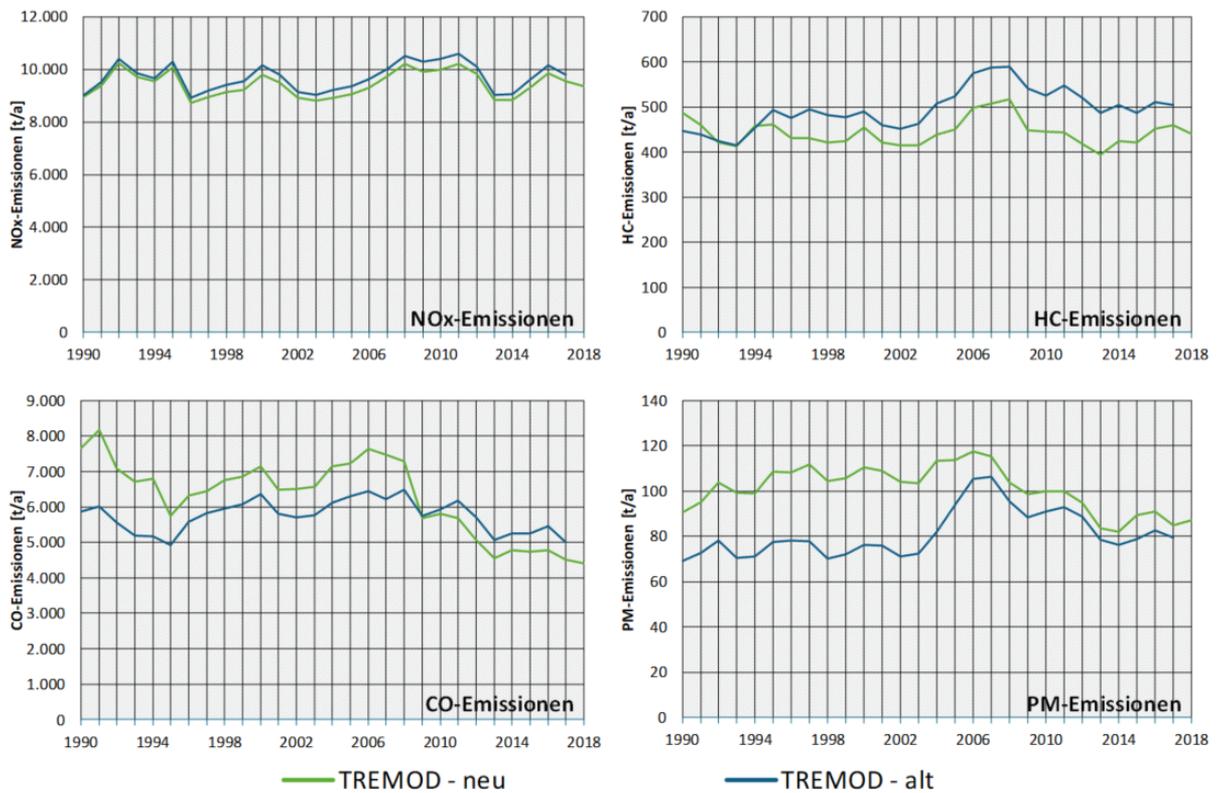


Quelle: eigene Berechnung (mit TREMOD)

2.5.5 Schadstoffe

Mit der vorliegenden Aktualisierung ändern sich die Emissionen der Schadstoffe über die gesamte Zeitreihe. Die meisten Emissionsfaktoren sind als konstant gesetzt und die Emissionen damit direkt proportional zum Kraftstoffverbrauch. Durch die Aktualisierung hat sich in diesen Fällen demnach keine signifikante Änderung ergeben. Demgegenüber werden die Emissionsfaktoren für NO_x , CO und HC und PM flugzeugtypenspezifisch definiert. Die Anpassung der Emissionsfaktoren einiger Flugzeugtypen haben somit Auswirkungen auf die absoluten Mengen dieser Schadstoffe. Abbildung 9 stellt vergleichend die Schadstoffemissionen dar. Während die NO_x -Emissionen durch die Anpassungen nur eine geringe Änderung aufweisen, erhöhen sich die CO- und PM-Emissionen aufgrund der Aktualisierung vor dem Jahr 2008. Nach 2008 ähneln sich die alte und die neue TREMOD-Version wieder. Dies hat insbesondere den Hintergrund, dass Flugzeugtypen, die vorwiegend in diesem Zeitraum verwendet werden, keine grundlegenden Anpassungen unterzogen worden sind, da diese bereits hinreichend genau modelliert waren. Die HC-Emissionen fallen durch die Aktualisierung geringer aus. Betrachtet man den zeitlichen Verlauf kann eine Stagnation der vier Schadstoffemissionen beim nationalen Flugverkehr festgestellt werden. Dies ist bemerkenswert, da im selben Zeitraum sowohl die Verkehrsleistung als auch der Kraftstoffverbrauch deutlich stiegen. Demnach sanken die kraftstoffspezifischen NO_x -, CO-, HC- und PM-Emissionen.

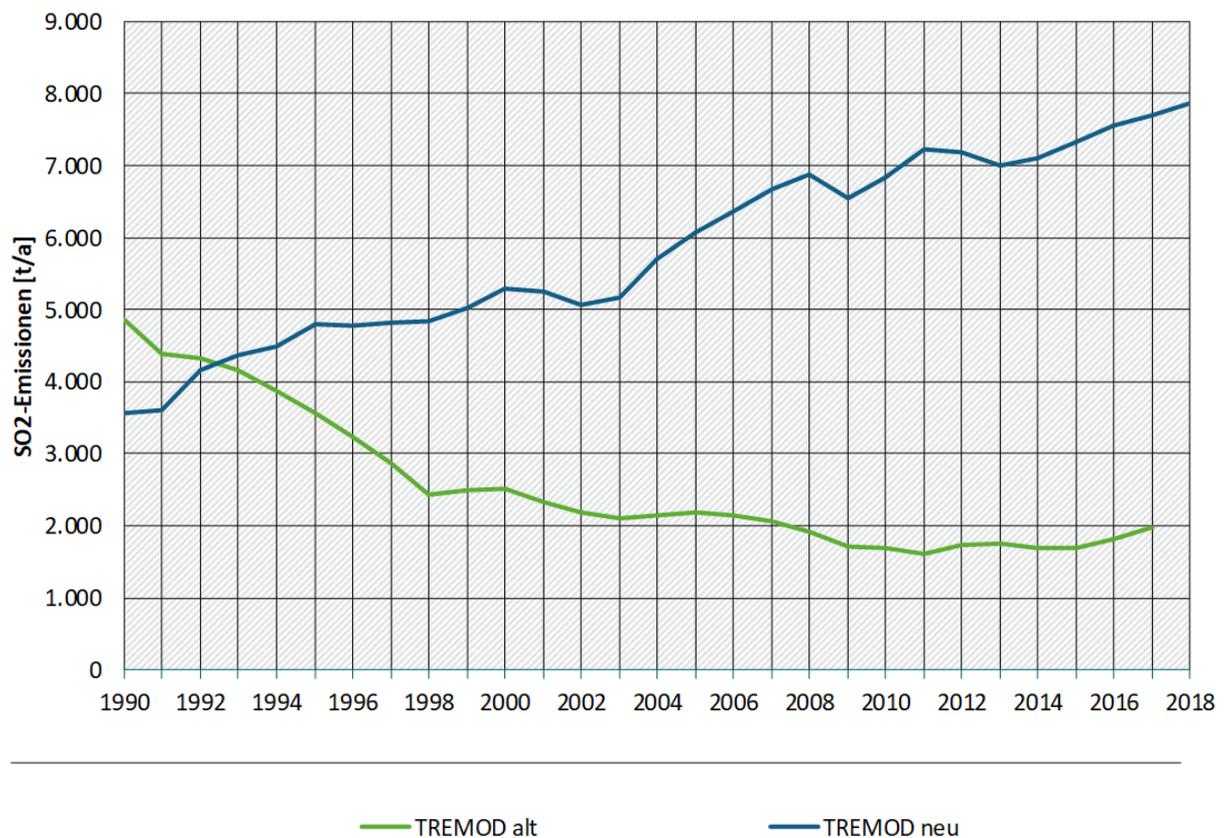
Abbildung 9: NO_x-, CO-, HC- und PM-Emissionen des nationalen Flugverkehrs auf den ausgewählten Flughäfen 1990-2018



Quelle: eigene Berechnung (mit TREMOD)

Bei den kraftstoffspezifischen Emissionen wurde eine Anpassung des Schwefelgehalts vorgenommen. Stellt man die SO₂-Emissionen der alten und neuen TREMOD-Version gegenüber, können deutliche Abweichungen festgestellt werden. Entgegen der rückläufigen Entwicklung bei der alten TREMOD-Version, wird nun von einem Anstieg proportional zum Anstieg des Kraftstoffbedarfs angenommen. Der Hintergrund ist, dass vor der Aktualisierung von einer Verringerung des kraftstoffspezifischen Emissionsfaktors von SO₂ ausgegangen wurde, wogegen nun ein konstanter Wert für den gesamten Zeitraum angesetzt wird.

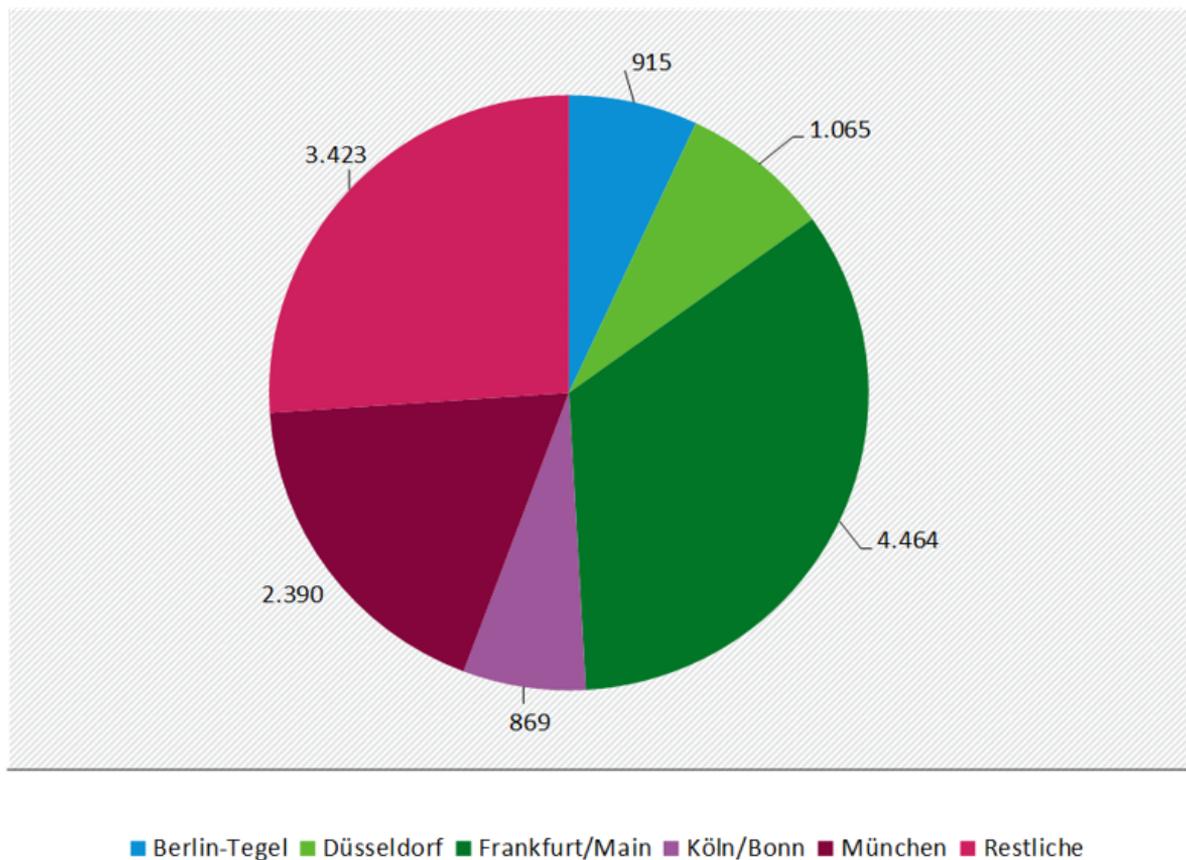
Abbildung 10: SO₂-Emissionen des gesamten Flugverkehrs in Deutschland



Quelle: eigene Berechnung (mit TREMOD)

Im Rahmen der Aktualisierung wurde eine Anpassung der Emissionen aus der LTO-Phase vorgenommen. Dies ermöglicht nun eine fundierte Abschätzung der Emissionen auf den ausgewählten Flughäfen. Abbildung 11 zeigt exemplarisch die NO_x-Emissionen des gewerblichen Flugverkehrs der fünf größten Flughäfen im Jahr 2018. Die größte Belastung hat der Flughafen Frankfurt am Main mit rund 4.464 t NO_x pro Jahr (ca. 34 %). Die fünf Flughäfen haben einen Anteil von 74 % an den gesamten bodennahen NO_x-Emissionen (aus der LTO-Phase).

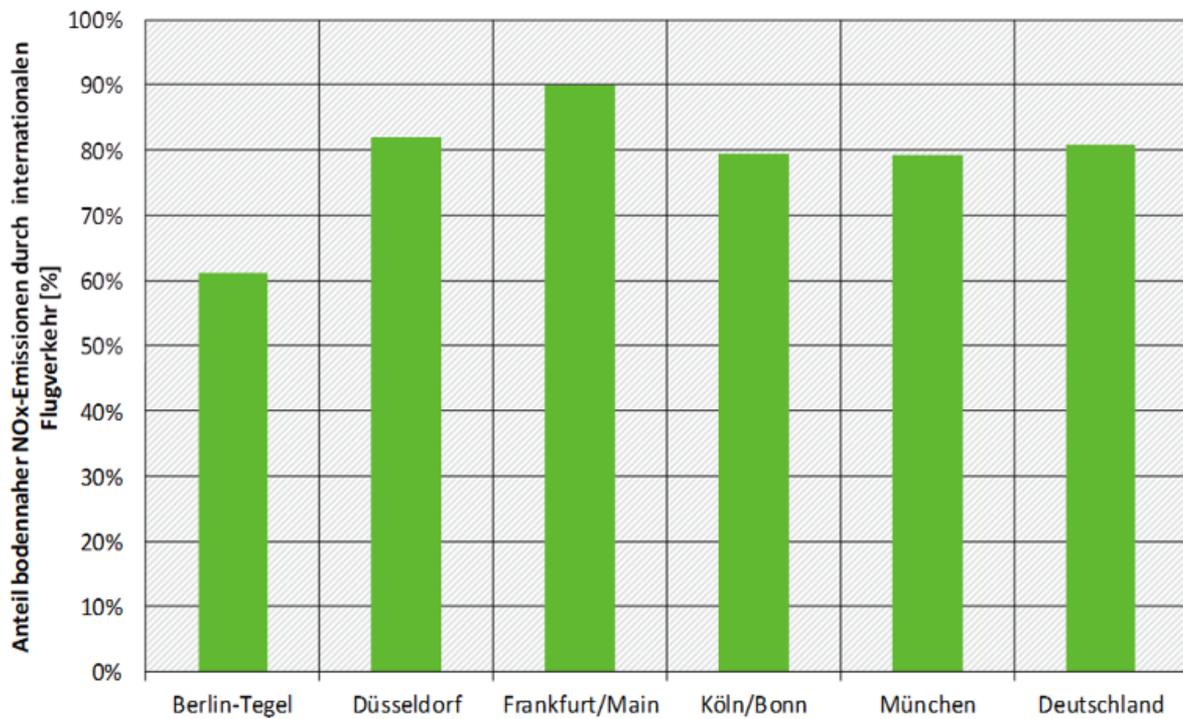
Abbildung 11: NO_x-Emission des gewerblichen Flugverkehrs in der LTO-Phase im Jahr 2018 differenziert nach Flughäfen [t/a]



Anmerkung: Der nicht gewerbliche Flugverkehr ist hier nicht berücksichtigt, jedoch weist dieser insgesamt nur einen Anteil an der LTO-Phase von ca. 0,9 % auf. Quelle: eigene Berechnung (mit TREMOD)

Der Anteil des internationalen Verkehrs an den LTO-Emissionen der genannten Flughäfen variiert stark. Frankfurt weist den größten Anteil mit rund 90 %, wogegen in Berlin (Tegel) lediglich 61 % der bodennahen NO_x-Emissionen auf den internationalen Verkehr zurückzuführen sind. Abbildung 12 zeigt den Vergleich. Vergleicht man den durchschnittlichen Anteil an den NO_x-Emissionen (81 %) mit dem Anteil des internationalen Verkehrs an den Starts (nur gewerbliche Verkehre) von 54 % sieht man, dass der NO_x-Emissionsanteil des internationalen Verkehrs überproportional ist. Dies hat insbesondere den Hintergrund, dass im internationalen Verkehr größere Maschinen eingesetzt werden.

Abbildung 12: Anteil des internationalen Verkehrs an den NO_x-Emissionen des gesamten gewerblichen Verkehrs in der LTO-Phase



Anmerkung: Der nicht gewerbliche Flugverkehr ist hier nicht berücksichtigt, jedoch weist dieser insgesamt nur einen Anteil an der LTO-Phase von ca. 0,9 % auf. Quelle: eigene Berechnung (mit TREMOD)

3 Aktualisierung des Trendszenarios bis 2050

3.1 Definition des Trendszenarios

Zur Abschätzung der möglichen zukünftigen Entwicklung des verkehrsbedingten Energieverbrauchs und der Emissionen wird in TREMOD ein Trendszenario bis zum Jahr 2050 definiert. Das Trendszenario soll auf aktuellen Verkehrsleistungsprognosen aufbauen und alle umweltrelevanten politischen Vorgaben, deren Umsetzung beschlossen ist, abbilden. Es sind alle wichtigen Beschlüsse berücksichtigt, die bis Mitte 2018 in Kraft getreten sind.

Das Szenario baut auf der Verkehrsleistungsentwicklung der Verkehrsprognose 2030 (Schubert 2014) auf. Die Fortschreibung bis 2050 wird z.T. in Anlehnung an das Referenzszenario des Vorhabens (Bergk et al. 2016) vorgenommen. Dieses Szenario bildet eine Verkehrsleistungsentwicklung bis 2050 ab. Einzelne Entwicklungen wurden jedoch aufgrund erkennbarer aktueller Entwicklungen angepasst, z.B. beim Personenverkehr auf Straße und Schiene sowie beim Binnenschiffsverkehr.

Außerdem sind aktuelle Grenzwertverordnungen der EU, die kurz vor der Verabschiedung stehen, berücksichtigt, z.B.:

- ▶ CO₂-Grenzwerte für PKW und leichte Nutzfahrzeuge bis 2030 (Europäische Kommission 2017), (Council of the EU 2018)
- ▶ CO₂-Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge bis 2030 (ENVI 2018), (European Commission 2018)
- ▶ Erneuerbare-Energien-Richtlinie bis 2030 (EU 2018)

Die vorgegebenen Verkehrsleistungen müssen in TREMOD umgelegt werden auf Fahrleistungen und Betriebsleistungen mit den entsprechenden Anteilen der verschiedenen Fahrzeugkategorien und Traktionsarten. Es sind daher u.a. Annahmen zu treffen zur

- ▶ Entwicklung des Fahrzeugbestands nach Antriebsarten, Größenklassen, Emissionsstandards
- ▶ Entwicklung der Fahrleistungsanteile nach Straßenkategorien
- ▶ Entwicklung der Fahrzeugauslastung

Für die Emissionsberechnung sind schließlich Annahmen zur Entwicklung der Energieeffizienz und des Emissionsverhaltens neuer Fahrzeugkonzepte sowie der zukünftige Anteil der Biokraftstoffe und anderer Energiearten festzulegen. Alle diese Annahmen wurden in einem gemeinsamen Abstimmungsprozess von UBA und IFEU festgelegt.

Die getroffenen Annahmen sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

3.2 Sozio-ökonomische Annahmen

Die bisherige Grundlage für die Verkehrsentwicklung im Trendszenario war die Verkehrsprognose 2030 (Schubert 2014). Mit der Erweiterung des Szenarios bis 2050 musste eine Aktualisierung der Kennzahlen vorgenommen werden. Hierzu wurden aktuelle Bevölkerungsvorausschätzungen von DESTATIS und andere Quellen verwendet (siehe Tabelle 44). Die aktualisierte Grundlage unterscheidet sich bis 2030 nur unwesentlich von den Annahmen der Verkehrsprognose 2030.

Die sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen des Trendszenarios gehen direkt in die Fortschreibung der Verkehrsleistung des Personenverkehrs ein.

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Annahmen der bisher zugrunde liegenden Verkehrs-prognose 2030 sowie die aktuellen Annahmen dargestellt.

Tabelle 44: Sozio-ökonomische Randbedingungen der „Verkehrsprognose 2030“ und aktuelle Annahmen für das TREMOD- Trendszenario

Parameter	Verkehrsprognose 2030	Aktuelle Annahmen
Demografische Entwicklung	2030: 79,7 Mio. Einwohner, davon 31 % 65 Jahre und älter	2030: 79,2 Mio. Einwohner, davon 24 % Rentner, 84 % Erwachsene 2040: 75,9 Mio. Einwohner, davon 28 % Rentner, 85 % Erwachsene 2050: 71,9 Mio. Einwohner, davon 29 % Rentner, 86 % Erwachsene Quelle: DESTATIS 2018*, Variante Kontinuität bei schwächerer Zuwanderung*
Wirtschaftsentwicklung (BIP)	Durchschnittliche Wachstumsrate real +1,14 % p.a. (2010-2030)	Bis 2023: absolutes BIP-Wachstum um 1,55 % p.a. ** Ab 2024: konstantes Wachstum des BIP je Einwohner um 514 €2017/a, entsprechend Trend 1970-2017***
Mobilitätskosten	Zeitraum 2010-2030: Pkw: +0,5% p.a.: ÖSPV: +1% p.a.: SPNV: +0,5% p.a.: SPFV: +0,5% p.a.:	k.a.
Kosten im Güterverkehr	Straße: Keine Kostenänderung: Schiene: -0,5% p.a. Binnenschiff: -0,6% p.a.	k.a.
Kraftstoffpreise	Rohölpreis 2030 real 120 US\$2010/bbl (Anstieg 2,1% p.a. gegenüber 2010)	k.a.

Quellen: *(DESTATIS 2019a); **(BMWi 2018); ***(Räth 2009)

3.3 Entwicklung der Verkehrs-, Fahr- und Betriebsleistungen

3.3.1 Annahmen zur Verkehrsleistungsentwicklung

3.3.1.1 Personenverkehr

Die Verkehrsprognose 2030 geht beim motorisierten Individualverkehr zwischen 2010 und 2030 von einer Zunahme von knapp 10 % aus. Da die Verkehrsleistung bis 2017 bereits um 8,4 % zugenommen hat, erscheint diese Zunahme zu niedrig. Die Verkehrsleistung wird daher aufgrund der aktuellen Entwicklung bis 2017 sowie der Bevölkerungsentwicklung neu abgeschätzt und bis 2050 fortgeschrieben.

Beim Öffentlichen Straßenpersonenverkehr (Busse, kommunaler Schienenverkehr) wurde in der Verkehrsprognose 2030 ein Anstieg der Verkehrsleistung von 6 % zwischen 2010 und 2030 prognostiziert. Der darin enthaltene Fernlinienbusverkehr nimmt mit 12,7 % stärker zu. Für die Zeit nach 2030 wird von stagnierenden und nach 2040 von leicht abnehmenden Verkehrsleistungen ausgegangen. In TREMOD liegen die berechneten Verkehrsleistungen etwas höher, da für den in der Verkehrsleistungsstatistik nicht erfassten sonstigen Busverkehr eine Verkehrsleistung abgeschätzt wird (siehe Anhang A.4), die proportional zur Fahrleistungsentwicklung fortgeschrieben wird.

Der Eisenbahnverkehr folgt bis 2030 den Annahmen der VP 2030. Von 2030 bis 2050 folgt die Entwicklung des Eisenbahnverkehrs der Gesamtentwicklung des inländischen Straßenpersonenverkehrs. Der Modal Split Straße-Schiene wird dabei als konstant angenommen.

Der Luftverkehr nimmt bis 2030 nach der VP 2030 noch um knapp 79 % zu (bezogen auf den gesamten abgehenden Verkehr gemäß Standortprinzip). Die Zunahme im innerdeutschen Luftverkehr ist mit 15 % deutlich geringer. Für die Zeit nach 2030 wird die Zunahme wie in der Studie (Bergk et al. 2016) angenommen.

Tabelle 45: Entwicklung der Personenverkehrsleistung 2010-2050 (bisherige Annahmen in Klammern)

In Mrd. Pkm	MIV	ÖSPV	Eisenbahn	Luftverkehr
2010	902,9	78,1 (89,6 + 16,2)	84,0	192,9
2030	988,9	82,8 (94,7 + 17,0)	100,1	344,7
2040	986,4	84,8 (94,4 + 16,8)	101,4	382,5
2050	962,3	84,0 (94,4 + 16,7)	99,0	420,2
2010-2030	+9,5%	+6,0*%	+19,2%	+78,7%
2030-2050	-2,7%%	-1,0%	-1,0%	+21,9%

Anmerkungen: Luftverkehr nach Standortprinzip; ÖSPV: Statistisch erfasste Verkehrsleistung der Verkehrsprognose 2030, in Klammern: TREMOD gesamter Busverkehr + SSU-Bahnen

*darunter Fernlinienbus: 2010-2030 +12,7%

Quelle: Verkehrsprognose 2030, Eigene Annahmen, (Bergk et al. 2016)

3.3.1.2 Güterverkehr

Die Entwicklung der Güterverkehrsleistung 2010 bis 2030 wird für Straße und Schiene direkt aus der Verkehrsprognose 2030 übernommen. Diese entspricht dem Trend der Verkehrsleistungsentwicklung bis 2017. Dagegen sind bei der Binnenschifffahrt die Verkehrsleistungen von 2010 bis 2017 gesunken. Es wird daher angenommen, dass 2030 eine geringere Verkehrsleistung erreicht wird als in der VP 2030. Für den Flugverkehr wird von der VP 2030 keine Verkehrsleistung prognostiziert. Es werden daher die Änderungsraten des Personenverkehrs übernommen.

Die Fortschreibung bis 2050 folgt dem Trend, wie er im Referenzszenario in (Bergk et al. 2016) angenommen wurde. Dabei verlangsamt sich das jährliche Wachstum gegenüber der Periode 2010 bis 2030 deutlich. Beim Binnenschiff ergibt sich ab 2030 ein leichter Rückgang.

Tabelle 46: Entwicklung der Transportleistung 2010-2050 (bisherige Annahmen in Klammern, sofern abweichend)

in Mrd. tkm	Straße	Schiene	Binnenschiff	Luftverkehr
2010	440,6	107,9	62,3	10,8
2030	607,4	153,7	64,7 (76,5)	19,2
2040	660,9	170,0	63,7	22,5
2050	714,3	186,2	62,7	24,7
2010-2030	+38%	+43%	+4,0%	+78,7%
2030-2050	+18%	+21%	-3,1%	+21,9%

Anmerkung: Annahme Verkehrsleistung Luftverkehr 2030: gleiche Zunahme wie Personenverkehr

Quelle: Verkehrsprognose 2030 (Straße, Schiene; eigene Annahme (Binnenschiff, Luftverkehr); Referenzszenario aus (Bergk et al. 2016)

3.3.2 Annahmen zur Fahrleistungsentwicklung im Straßenverkehr

Die Fahrleistungsentwicklung orientiert sich an der Verkehrsleistungsentwicklung. Für die einzelnen Fahrzeugkategorien werden folgende Annahmen getroffen:

Pkw: Bei unveränderter Auslastung verläuft die Fahrleistungsentwicklung der Pkw proportional zur Verkehrsleistungsentwicklung.

LNF: Der Fahrleistungsanstieg entspricht demjenigen der VP 2030. Bis 2050 wird der Trend fortgeschrieben

SNF: Die Grundtendenzen des bisherigen Trend-Szenarios bleiben erhalten, d.h. die Auslastung der Fahrzeuge steigt bis 2030 um 10 % und die Verkehrsleistungszunahme wird stärker von den größeren Fahrzeugen erbracht. Dadurch steigt die Fahrleistung der schweren Lkw von 2010 bis 2030 um insgesamt 24 % bei einem Verkehrsleistungsanstieg von 38 %. Bis 2050 steigt die Fahrleistung um weitere 9 % an, bei einem Verkehrsleistungsanstieg von 18 %.

Tabelle 22: Entwicklung der Fahrleistungen im Trendszenario bis 2050

	FL gesamt (Mrd. km)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	sonstige
2010	713,6	595,4	15,2	4,0	39,2	56,9	2,8
2011	724,9	605,1	14,8	4,0	39,7	58,5	2,8
2012	725,6	606,4	14,4	4,0	40,2	57,8	2,8
2013	731,6	611,4	14,2	4,1	40,7	58,4	2,8
2014	743,1	622,1	14,2	4,2	41,1	58,7	2,9
2015	755,3	629,5	14,5	4,2	44,7	59,6	2,7
2016	765,6	636,7	14,5	4,3	46,8	60,5	2,8
2017	774,2	642,3	14,5	4,2	49,0	61,6	2,7
2018	777,7	642,3	14,7	4,2	51,3	62,5	2,8
2020	787,5	650,3	14,5	4,3	52,3	63,3	2,9

	FL gesamt (Mrd. km)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	sonstige
2030	829,1	677,1	14,2	4,3	59,5	70,6	3,4
2040	839,6	675,3	14,2	4,4	68,5	73,9	3,4
2050	835,1	658,5	14,2	4,4	77,4	77,2	3,4

Anmerkungen: bis 2018 real, 2020 bis 2050 Annahmen Trendszenario

3.3.3 Betriebsleistung und Auslastung im Schienenverkehr

Die Auslastungsgrade des Personenverkehrs der DB AG nahm bis 2018 zu. Im Szenario werden diese Werte bis 2020 noch leicht erhöht und ab 2020 konstant fortgeschrieben. Beim Güterverkehr gibt es in einzelnen Jahren Schwankungen nach oben und unten. Im Szenario wird ein konstanter Wert von 58 % ab 2020 angenommen. Die Auslastungsgrade der DB AG wurden mangels eigener Daten auch für den Eisenbahnverkehr der NE-Bahnen übernommen.

Tabelle 47: Entwicklung der Auslastungsgrade im Güter-, Personenfern- und Personennahverkehr der DB

Zuggattung	2008	2010	2014	2018	Ab 2020
GV	47,6%	50,0%	47,5%	57,3%	58,0%
PFV	46,1%	48,0%	49,9%	56,3%	57,0%
PNV	25,5%	25,0%	27,9%	28,0%	28,0%

Bei den Anteilen der Betriebsarten Diesel- und Elektrotraktion wurde unterstellt, dass sich die Tendenz zur Zunahme des Anteils elektrisch betriebener Züge fortsetzt. Neben der Elektrifizierung bzw. des Neubaus weiterer Strecken spielt hierbei auch die Bündelung der Verkehrsleistungen auf den Hauptverkehrsstrecken eine Rolle. Die angenommenen Anteile der Dieseltraktion an den Betriebsleistungen der DB sind in Tabelle 48 zusammengefasst. Beim Eisenbahnverkehr der NE-Bahnen wird ebenfalls eine Abnahme des Anteils der Dieseltraktion angenommen, die im Personennahverkehr noch höher ist als bei der DB AG (siehe Kapitel 2.2.3).

Tabelle 48: Entwicklung des Dieselanteils an den Betriebsleistungen im Güter-, Personenfern- und Personennahverkehr der DB

Bereich	2008	2010	2018	2020	2030	2050
GV	4,2%	3,6%	4,3%	3,0%	2,5%	2,1%
PFV	2,3%	2,0%	1,8%	1,6%	1,6%	1,4%
PNV	18,2%	16,8%	13,2%	13,0%	12,0%	11,0%

3.3.4 Schiffskilometer und Auslastung der Binnenschifffahrt

Die Verkehrsleistungen der Binnenschifffahrt werden über die Größenklassenverteilung (Tragfähigkeitsklassen) der Schiffe und die mittlere Auslastung der Tragfähigkeit in die zurückgelegten Schiffskilometer umgerechnet.

Die Annahmen des bisherigen Trendszenarios (siehe (Heidt et al. 2016) zur Flottenentwicklung und zur Auslastung werden beibehalten. Wesentliche Änderungen sind die geringere Verkehrsleistungszunahme bis 2030, wie zu Beginn dieses Kapitel beschrieben, und die Fortschreibung der Verkehrs- und Fahrleistungen bis 2050.

3.4 Entwicklung der Fahrzeugflotten im Straßenverkehr

Die Fortschreibung der Fahrzeugflotten wird in TREMOD mit Hilfe eines Umschichtungsmodells berechnet. Damit wird der zukünftige Bestand mit Hilfe von Annahmen zur Anzahl der jährlichen Neuzulassungen und Überlebenswahrscheinlichkeiten für jede Fahrzeugkategorie und Antriebstechnologie berechnet.

Die Entwicklung der Antriebsarten wurde gegenüber der letzten Version von TREMOD grundlegend überarbeitet. Insbesondere wird eine stärkere Durchdringung der Elektromobilität in allen Fahrzeugkategorien als bisher angenommen. Dabei wurde berücksichtigt, dass sich aktuelle vermehrt der Trend zu einer zunehmenden Elektrifizierung zeigt. So plant bspw. Volvo ab 2019 keine Fahrzeuge ohne Elektromotor mehr anbieten zu wollen und Städte wie Paris verfolgen das Ziel bis 2030 Pkw ohne Verbrennungsmotor aus der Stadt zu verbannen. Weiterhin ist abzusehen, dass die aktuell auf EU-Ebene diskutierten CO₂-Grenzwerte starke Anreize für die Einführung von Niedrig- bzw. Nullemissionsfahrzeugen für PKW, LNF, SNF und Busse setzen. Die konkreten Annahmen sind in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Die Annahmen zur Einführung neuer Eurostufen bei den Neuzulassungen sind im Kapitel „Entwicklung der spezifischen Emissionen“ dargestellt.

3.4.1 Personenkraftwagen

3.4.1.1 Pkw-Neuzulassungszahl und -anteile

Die absoluten Pkw-Neuzulassungen für das Jahr 2018 sind durch die KBA-Statistik gegeben. Für den Zeitraum 2019-2030 wird von einer konstanten Neuzulassungszahl in Höhe von 3,2 Mio. Fahrzeugen pro Jahr ausgegangen. Dies entspricht dem Durchschnitt der vorausgegangenen zwölf Jahren. Längerfristig ist davon auszugehen, dass es zu starken sozio-ökonomischen Veränderungen kommen wird. Dies wird einen Einfluss auf die Pkw-Neuzulassungen haben. Für den Zeitraum ab 2030 wird daher angenommen, dass es zu einem Rückgang der Pkw-Neuzulassungen kommen wird. Der Wert sinkt bis zum Jahr 2050 auf 2,85 Mio. jährliche Neuzulassungen.

Die Anteile der Antriebsarten an den Pkw-Neuzulassungen werden anhand der aktuellen CO₂-Regulierung der EU (EC 443/2009) und den Vorschlägen der EU-Kommission für den Zeitraum nach 2020, sowie den angenommenen Effizienzverbesserungen je Antriebsart (siehe Abschnitt 3.5.1) hergeleitet. Der Anteil von Fahrzeugen mit externer Stromversorgung (PHEV und BEV) muss demnach deutlich steigen, um die Grenzwert im Jahr 2020 zu erreichen. Neben dem deutlichen Anstieg der elektrischen Fahrzeuge wird für den Zeitraum von 2018 bis 2020 angenommen, dass der Anteil von Diesel-Pkw (inkl. HEV) aufgrund möglicher bzw. bereits umgesetzter Fahrverbote und dem damit verbundenen „Image-Schaden“ sinken wird. Für Fahrzeuge mit einem Ottomotor (inkl. HEV) wird ein leichter Rückgang in den Zulassungszahlen angenommen, wogegen die Anteile von CNG und LPG steigen. Um die notwendigen Flottenmittelwert für 2025 und 2030 zu erreichen, wird von einer Verdrängung der konventionellen Verbrennerfahrzeugen ausgegangen. Lediglich der Anteil von CNG-Fahrzeugen steigt bis zum Jahr 2025 und wird dann ebenfalls rückläufig angenommen. Das Verhältnis von

Otto- zu Dieselfahrzeugen wird ab dem Jahr 2020 als konstant angesetzt. Die Anteile für das Jahr 2050 ergeben sich nicht aus den Grenzwerten. Hier wird ein Zielwert von 65 % extern geladener elektrischer Fahrzeuge angesetzt.

Tabelle 25 fasst die angenommenen Anteile für die Stützjahre zusammen. Zwischen den Stützjahren wird linear interpoliert.

Tabelle 49: Anteil der Neuzulassungen der PKW im Trendszenario nach Antriebsart

Jahr	Otto (inkl. HEV)	Diesel (inkl. HEV)	CNG (inkl. HEV)	LPG (inkl. HEV)	PHEV - Otto	PHEV - Diesel	BEV
2017	58,5 %	39,6 %	0,1 %	0,1 %	0,8 %	0,0 %	0,7 %
2018	64,7 %	32,8 %	0,3 %	0,1 %	0,9 %	0,0 %	1,0 %
2020	61,1 %	25,5 %	1,9 %	0,9 %	5,5 %	0,2 %	5,0 %
2025	51,9 %	21,6 %	2,7 %	0,8 %	7,8 %	0,5 %	14,7 %
2030	40,6 %	16,9 %	2,1 %	0,6 %	12,4 %	1,4 %	26,0 %
2040	32,1 %	13,4 %	1,7 %	0,5 %	14,8 %	3,2 %	34,5 %
2050	23,6 %	9,8 %	1,2 %	0,4 %	16,5 %	5,5 %	43,0 %

Anmerkungen: 2017 und 2018 real nach KBA-Statistik, 2020 bis 2050 Annahmen Trendszenario

3.4.1.2 Pkw-Überlebenswahrscheinlichkeiten und -bestand

Bei den Pkw ist aktuell der Trend erkennbar, dass Fahrzeuge von Jahr zu Jahr eine höhere Überlebenswahrscheinlichkeit aufweisen. Daher ist eine Anpassung der Überlebenskurven notwendig. Die Überlebenswahrscheinlichkeiten werden für alle Fahrzeugkategorien und Antriebsarten aus der aktuellen Fahrzeugstatistik des KBA abgeleitet. Diese statistischen Werte beruhen auf der Änderungsrate der Altersstruktur zwischen den Jahren 2016 und 2017 (in den folgenden Abbildungen blau dargestellt). Die Kurven werden durch eine Regressionsfunktion abgebildet, wobei die Koeffizienten a , T anhand der statistischen Werte für jede Fahrzeugkategorie und Antriebsart ermittelt werden. Die Funktionen sind über Weibull-Verteilungen definiert, wobei die Überlebenswahrscheinlichkeit wie folgt definiert ist:

$$R(t) = e^{-\frac{t^a}{T}}$$

In TREMOD werden aus Gründen der Vereinfachung nur Fahrzeuge bis zu einem Alter von bis zu 30 Jahren berücksichtigt. Da jedoch auch Fahrzeuge im Bestand sind, die älter als 30 Jahre sind, werden die ermittelten Kurven in den letzten Jahren des Betrachtungszeitraums nach oben korrigiert. Dies ist nötig, um den Fahrzeugbestand mit einem geringeren Fehler abbilden zu können.

Die Statistik des KBA gibt an, dass die „Überlebenskurve“ der LPG-Pkw bis zum Alter von 10 Jahren über 100 % liegt. Dies ist auf Nachrüstungen von Otto-Pkw zurückzuführen. Durch die Verwendung der Regressionsfunktion wird dieser Effekt deutlich abgeschwächt, da die Weibull-Überlebensfunktion monoton fallend ist. Um den Gesamtbestand nicht zu verzerren, wird von einer flacheren Überlebenskurve in den Folgejahren ausgegangen.

Die Abschätzung der Überlebenswahrscheinlichkeiten für die Antriebsarten BEV und PHEV aus der Statistik ist derzeit noch nicht möglich, da die Bestands- und Zulassungszahlen noch relativ gering sind und somit zu wenig statistische Grundlagen für die Ableitung von

Überlebenswahrscheinlichkeiten vorliegen, insbesondere für den Zeithorizont über 10 Altersjahre. Für PHEV werden daher auch HEV in die Kurvenermittlung integriert. Für den Zeitraum, ab dem keine verlässlichen Daten mehr vorhanden sind, wird die jährliche Ausscheiderate eines Otto-Fahrzeugs herangezogen, um die Kurve zu extrapolieren.

Bei den Anteilen an den Pkw-Neuzulassungen wird angenommen, dass BEV vornehmlich Otto-Pkw und PHEV in erster Linie Diesel-Pkw ersetzen. Um diese Annahme hinsichtlich der Ableitung von Überlebenswahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen, wird eine Annäherung der Kurven von BEV und PHEV über die Zeit an die Otto-Kurve respektive Diesel-Kurve angenommen. Bei PHEV- und Diesel-Pkw sind die Unterschiede bzgl. der Überlebenswahrscheinlichkeiten nur marginal, sodass hier keine Anpassung an der PHEV-Kurve vorgenommen wird. Diese Kurve gilt somit analog zu den Pkw mit Verbrennungsmotor für das gesamte Szenario. Die BEV-Kurven werden demgegenüber der Otto-Kurve angenähert. Es werden Kurven für verschiedene Neuzulassungsjahre (≤2020, 2021-2025, 2026-2030 und 2031-2050) abgeleitet, um diese Annäherung abzubilden.

Die im Trend-Szenario verwendeten Überlebenswahrscheinlichkeiten der Pkw sind in Tabelle 50 zusammengefasst.

Tabelle 50: Überlebenswahrscheinlichkeiten der Pkw nach Antriebsart im Trend-Szenario

Alter	Pkw Otto ab 2019	Pkw Diesel ab 2019	Pkw LPG ab 2018	Pkw CNG ab 2019	Pkw PHEV ab 2019	Pkw BEV 2019-2020	Pkw BEV 2021-2025	Pkw BEV 2026-2030	Pkw BEV 2031-2050
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-1	0,998	0,977	0,997	0,985	0,975	0,975	0,986	0,992	0,995
-2	0,995	0,959	0,994	0,971	0,955	0,956	0,975	0,985	0,990
-3	0,991	0,935	0,989	0,952	0,931	0,931	0,961	0,976	0,984
-4	0,986	0,905	0,983	0,925	0,902	0,902	0,944	0,965	0,975
-5	0,977	0,869	0,973	0,890	0,869	0,868	0,923	0,950	0,964
-6	0,966	0,829	0,961	0,849	0,832	0,831	0,899	0,932	0,949
-7	0,952	0,785	0,945	0,800	0,793	0,790	0,871	0,911	0,932
-8	0,934	0,737	0,926	0,744	0,750	0,747	0,840	0,887	0,910
-9	0,911	0,686	0,903	0,683	0,706	0,701	0,806	0,859	0,885
-10	0,884	0,633	0,876	0,618	0,661	0,655	0,769	0,827	0,855
-11	0,860	0,583	0,857	0,551	0,617	0,607	0,734	0,797	0,828
-12	0,830	0,532	0,834	0,483	0,573	0,560	0,695	0,763	0,796
-13	0,796	0,482	0,807	0,417	0,530	0,514	0,655	0,725	0,761
-14	0,757	0,434	0,777	0,353	0,487	0,468	0,612	0,685	0,721
-15	0,714	0,387	0,742	0,293	0,445	0,424	0,569	0,641	0,678
-16	0,667	0,344	0,705	0,239	0,406	0,381	0,524	0,596	0,632
-17	0,618	0,303	0,666	0,192	0,368	0,341	0,480	0,549	0,583

Alter	Pkw Otto ab 2019	Pkw Diesel ab 2019	Pkw LPG ab 2018	Pkw CNG ab 2019	Pkw PHEV ab 2019	Pkw BEV 2019-2020	Pkw BEV 2021-2025	Pkw BEV 2026-2030	Pkw BEV 2031-2050
-18	0,567	0,267	0,626	0,151	0,332	0,303	0,435	0,501	0,534
-19	0,516	0,233	0,585	0,117	0,299	0,268	0,392	0,454	0,485
-20	0,465	0,204	0,544	0,090	0,268	0,236	0,350	0,408	0,436
-21	0,416	0,178	0,505	0,069	0,240	0,206	0,311	0,364	0,390
-22	0,370	0,156	0,468	0,053	0,215	0,179	0,275	0,322	0,346
-23	0,329	0,137	0,434	0,042	0,192	0,155	0,242	0,285	0,307
-24	0,292	0,121	0,404	0,034	0,171	0,133	0,212	0,252	0,272
-25	0,260	0,109	0,378	0,029	0,153	0,114	0,187	0,223	0,242
-26	0,234	0,099	0,357	0,026	0,137	0,097	0,165	0,200	0,217
-27	0,213	0,091	0,340	0,025	0,123	0,082	0,148	0,181	0,197
-28	0,198	0,085	0,327	0,024	0,111	0,070	0,134	0,166	0,182
-29	0,188	0,081	0,319	0,024	0,101	0,059	0,123	0,155	0,172
-30	0,181	0,079	0,315	0,025	0,093	0,050	0,116	0,149	0,165

Anmerkung: Die Tabelle zeigt den Anteil der Fahrzeuge, die nach x-Jahren noch im Bestand sind, bezogen auf das Neufahrzeug (Alter 0)

Quelle: eigene Auswertung anhand KBA-Statistik

Anhand der Neuzulassungszahlen und der technologiespezifischen Überlebenskurven können nun die jährlichen Pkw-Bestände über den gesamten Szenariozeithorizont ermittelt werden. Der Bestand steigt bis zum Jahr 2033 an und fällt dann insbesondere aufgrund der sinkenden Bevölkerung und den daraus resultierenden geringen Neuzulassungszahlen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 51 dargestellt.

Tabelle 51: Entwicklung der Pkw-Bestände nach Antriebsart 1990-2018 und im Trend-Szenario 2019-2050 (in Mio. Kfz)

Jahr	Pkw Otto	Pkw Diesel	Pkw LPG	Pkw CNG	Pkw PHEV Otto	Pkw PHEV Diesel	Pkw BEV	Pkw Gesamt
1990	27,3	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31,5
1991	29,0	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,4
1992	30,5	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	35,2
1993	32,0	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37,1
1994	32,8	5,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38,1
1995	33,5	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,0
1996	34,2	5,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,8

Jahr	Pkw Otto	Pkw Diesel	Pkw LPG	Pkw CNG	Pkw PHEV Otto	Pkw PHEV Diesel	Pkw BEV	Pkw Gesamt
1997	34,9	5,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40,5
1998	35,6	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	41,0
1999	36,4	5,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	42,1
2000	36,9	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	42,8
2001	37,4	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44,1
2002	37,2	7,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44,5
2003	36,9	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44,8
2004	36,5	8,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45,2
2005	36,1	9,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45,7
2006	35,8	10,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	46,3
2007	35,2	11,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	46,5
2008	30,8	10,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	41,3
2009	30,6	10,6	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	41,5
2010	30,5	11,0	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	42,0
2011	30,5	11,6	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	42,6
2012	30,4	12,2	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	43,2
2013	30,2	12,9	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	43,6
2014	30,0	13,5	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	44,1
2015	29,9	14,2	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	44,7
2016	30,0	14,8	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	45,4
2017	30,4	15,2	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	46,1
2018	31,0	15,2	0,4	0,1	0,1	0,0	0,1	46,8
2019	31,2	15,2	0,4	0,1	0,1	0,0	0,1	47,1
2020	31,9	15,1	0,4	0,1	0,3	0,0	0,3	48,0
2021	32,5	14,9	0,4	0,2	0,4	0,0	0,4	48,9
2022	33,0	14,6	0,4	0,2	0,6	0,0	0,7	49,6
2023	33,4	14,4	0,4	0,3	0,8	0,0	1,0	50,3
2024	33,7	14,1	0,4	0,4	1,0	0,0	1,3	50,9
2025	33,9	13,7	0,5	0,4	1,2	0,1	1,7	51,5
2026	34,0	13,4	0,5	0,5	1,5	0,1	2,1	52,0
2027	34,0	13,0	0,5	0,6	1,7	0,1	2,6	52,5

Jahr	Pkw Otto	Pkw Diesel	Pkw LPG	Pkw CNG	Pkw PHEV Otto	Pkw PHEV Diesel	Pkw BEV	Pkw Gesamt
2028	33,9	12,6	0,5	0,6	2,0	0,1	3,2	52,8
2029	33,6	12,2	0,5	0,7	2,2	0,2	3,8	53,1
2030	33,2	11,8	0,5	0,7	2,5	0,2	4,5	53,3
2031	32,8	11,4	0,5	0,7	2,8	0,2	5,1	53,5
2032	32,4	11,0	0,4	0,7	3,1	0,3	5,8	53,7
2033	31,9	10,5	0,4	0,8	3,4	0,3	6,4	53,7
2034	31,3	10,1	0,4	0,8	3,6	0,4	7,0	53,7
2035	30,7	9,8	0,4	0,8	3,9	0,4	7,6	53,6
2036	30,1	9,4	0,4	0,8	4,1	0,5	8,2	53,5
2037	29,4	9,0	0,4	0,8	4,4	0,5	8,8	53,3
2038	28,8	8,6	0,4	0,8	4,6	0,6	9,3	53,0
2039	28,1	8,3	0,4	0,7	4,8	0,6	9,8	52,8
2040	27,2	8,0	0,4	0,7	4,9	0,7	10,3	52,3
2041	26,5	7,7	0,4	0,7	5,1	0,8	10,8	52,0
2042	25,8	7,4	0,4	0,7	5,3	0,8	11,3	51,7
2043	25,1	7,1	0,4	0,7	5,4	0,9	11,7	51,4
2044	24,4	6,9	0,4	0,7	5,6	1,0	12,2	51,1
2045	23,8	6,6	0,4	0,6	5,7	1,0	12,6	50,7
2046	23,1	6,3	0,4	0,6	5,9	1,1	13,0	50,4
2047	22,4	6,1	0,4	0,6	6,0	1,2	13,4	50,0
2048	21,6	5,9	0,4	0,6	6,1	1,3	13,8	49,6
2049	20,9	5,7	0,3	0,6	6,2	1,4	14,1	49,2
2050	20,2	5,5	0,3	0,6	6,3	1,4	14,5	48,8

Quelle: KBA-Statistik bis 2018, ab 2019 eigene Berechnung

3.4.2 Leichte Nutzfahrzeuge

Für die Fortschreibung der Bestände der Lkw <3,5 t (LNF) wird ab 2018 ein jährlicher Anstieg in den Neuzulassungen angenommen. Im Zeitraum zwischen 2010 und 2017 stiegen nach KBA-Statistik die Neuzulassungen um 4,7 % pro Jahr. Für den gesamten Zeitraum wird weiterhin ein Anstieg angenommen, der allerdings mit 0,6 % p.a. geringer angesetzt wird. Diese Zahlen orientieren sich an dem unterstellten Anstieg der jährlichen Fahrleistung von LNF. Analog zum Pkw werden die geltenden und geplanten EU-Regularien herangezogen, um hieraus die Anteile neuer Fahrzeugkonzepte zu ermitteln (siehe Abschnitt 3.5.1).

Aus der Analyse ergeben sich die Anteile der Antriebsarten an den LNF-Neuzulassungen, die in Tabelle 52 gegeben sind.

Tabelle 52: Anteil der Neuzulassungen der LNF im Trendszenario nach Antriebsart

Jahr	Neuzulassungen	Otto (inkl. HEV+LPG)	Diesel (inkl. HEV)	CNG (inkl. HEV)	PHEV - Otto	PHEV - Diesel	BEV
2017	258.478	4,6%	93,3%	0,2%	0,0%	0,0%	1,9%
2018	278.286	6,4%	91,2%	0,3%	0,0%	0,0%	2,1%
2020	280.893	4,7%	92,3%	0,4%	0,3%	0,0%	2,3%
2025	287.411	4,4%	87,2%	0,7%	2,2%	0,2%	5,3%
2030	293.929	4,2%	82,1%	0,7%	4,0%	0,5%	8,6%
2050	320.000	2,2%	44,4%	0,4%	14,8%	4,9%	33,3%

Anmerkungen: 2017, 2018 real abgeleitet aus KBA-Statistik, 2020 bis 2050 Annahmen Trendszenario

Neben der Anpassung der Neuzulassungen werden ebenfalls die Überlebenswahrscheinlichkeiten der LNF angepasst. Im Gegensatz zum Pkw wird hier nicht zwischen den Antriebsarten differenziert. Dies hat u.a. den Hintergrund, dass für PHEV und BEV keine ausreichenden Daten vorliegen und bei den konventionellen Fahrzeugen keine großen Unterschiede festzustellen sind. Die Überlebenswahrscheinlichkeiten der LNF sind in Tabelle 55 dargestellt.

3.4.3 Schwere Nutzfahrzeuge

Die Zulassungen der SNF sind in Tabelle 53 dargestellt. Diese werden unterschieden in LKW < 12 t und LKW ≥ 12 t, Sattelzugmaschinen und schwere übrige Kfz. Von 2010 bis 2018 nahmen lediglich die Neuzulassungen der LKW < 12 t ab, bei allen übrigen Kategorien, insbesondere bei Sattelzügen, nahmen die Neuzulassungen zu.

Für das Trendszenario wird angenommen, dass sich die Neuzulassungen relativ zu den bisherigen Trends und zur Fahrleistungsentwicklung verhalten. Infolgedessen nimmt die Anzahl der LKW zukünftig ab und die Anzahl der Sattelzugmaschinen nimmt deutlich zu.

Tabelle 53: Anzahl jährlicher Neuzulassungen der SNF im Trendszenario (in 1000 Fahrzeugen)

Baujahr	LKW gesamt	LKW < 12 t	LKW ≥ 12t	SZ gesamt	UeKfzs gesamt
2010	43,9	19,3	24,6	27,9	8,6
2017	42,5	17,0	25,5	38,6	11,6
2018	43,7	17,2	26,4	38,7	12,0
2030	39,0	15,6	23,4	38,7	12,0
2050	36,9	14,8	22,1	41,8	12,0

Quelle: 2010, 2017, 2018 Auswertung von KBA-Daten, nach 2018 eigenen Annahmen

Bis 2018 werden als alternative Antriebe der SNF bisher CNG/LNG und batterieelektrische Fahrzeuge unterschieden. Die große Mehrheit der Neuzulassungen waren jedoch Dieselfahrzeuge. Die zukünftige Entwicklung kann nur mit großen Unsicherheiten abgeschätzt werden. Um dennoch einen realistischen Trend zu beschreiben, wurden folgende Aspekte betrachtet:

- ▶ Heute verfügbare Technologien und Marktreife: Kurzfristig scheint vor allem eine Elektrifizierung mittels batterieelektrischer LKW im urbanen Verteilerverkehr realistisch. Mehrere LKW-Hersteller z.B. Daimler, MAN oder Volvo haben Entwicklungen in diesem Bereich angekündigt und entsprechende Fahrzeuge werden bereits in Pilotversuchen oder kleineren Flotten eingesetzt (T&E 2018). Für den Fernverkehr sind derzeit nur Erdgas-Fahrzeuge verfügbar, weitere Technologien wie Brennstoffzellen- oder Hybrid-Oberleitungs-SNF befinden sich noch in der Erprobung. Alle dieser Optionen für den Fernverkehr sind aber vom Vorhandensein einer entsprechenden Betankungs- bzw. Ladeinfrastruktur abhängig, deren flächendeckende Verfügbarkeit noch sehr unsicher ist.
- ▶ Anrechnung zu den CO₂-Grenzwerten von SNF (vgl. Kapitel 3.5.2): Die europäischen CO₂-Grenzwerte beinhalten aktuell Anrechnungsmöglichkeiten von Niedrig- oder Nullemissionsfahrzeugen (zero and low emission vehicles, ZLEVs) zu den Flottenzielwerten für SNF, siehe (EU 2019). Das Parlament (ENVI 2018) schlug hingegen eine Mindestquote für ZLEVs von 5 % im Jahr 2025 und 20 % im Jahr 2030 vor, wobei ein ZLEV eine spezifische CO₂-Minderung von mindestens -35 % gegenüber dem Referenzwert der jeweiligen Fahrzeugklasse in 2019 erreichen muss. Nach heutigem Kenntnisstand können solche Minderungen auch ohne alternative Kraftstoffe z.B. über Hybridisierung und Verringerung des Luft- und Rollwiderstands erreicht werden. Es ist davon auszugehen, dass die CO₂-Grenzwerte den Absatz von Elektrofahrzeuge nur dann steigern, wenn die Mehrkosten nicht deutlich höher als bei effizienten Dieselfahrzeugen liegen.
- ▶ Korridor anderer Studien: Im Vergleich dreier Studien durch (Wietschel et al. 2018) mit Bezugsraum Deutschland wurden in Referenzszenarien für das Jahr 2050 im Bereich der LKW folgende Bandbreiten für den Anteil am Bestand gegeben: BEV 0-8 %; CNG/LNG 0-14 %, Wasserstoff 0-<1 %. Die Bandbreite reicht also von überhaupt keinen alternativen Kraftstoffen bis hin zu einem mäßigen Einsatz von batterieelektrischen oder Erdgas-LKW.

Für das Trendszenario wird angenommen, dass batterieelektrische Fahrzeuge lediglich im Bereich der LKW < 12 t einen nennenswerten Marktanteil erreichen (5 % in 2030, 20 % in 2050). Bei den größeren LKW und den Sattelzügen erfolgt die Einführung verzögert und in geringerem Umfang. CNG und LNG werden zukünftig bei den LKW ≥ 12 t und Sattelzügen stärker eingesetzt, bleiben aber eine Nischentechnologie. Die Entwicklung nach Antriebsarten zeigt Tabelle 33.

Tabelle 54: Anteil der Neuzulassungen der SNF im Trendszenario nach Antriebsart

Baujahr	Diesel	CNG/LNG	BEV
LKW <12t			
2017	99,7%	0,1%	0,2%
2018	98,3%	0,4%	1,4%
2020	97,3%	0,5%	2,1%
2030	94,0%	1,0%	5,0%
2050	69,0%	1,0%	30,0%

Baujahr	Diesel	CNG/LNG	BEV
LKW ≥ 12t			
2017	100,0%	0,0%	0,0%
2018	99,8%	0,1%	0,0%
2020	99,8%	0,1%	0,1%
2030	99,0%	0,5%	0,5%
2050	96,0%	2,0%	2,0%
SZ			
2017	99,8%	0,2%	0,0%
2018	99,8%	0,2%	0,0%
2020	99,8%	0,2%	0,0%
2030	99,0%	0,5%	0,5%
2050	96,0%	2,0%	2,0%

Quelle: 2017 Auswertung von KBA-Daten, ab 2020 eigenen Annahmen

Die Überlebenskurven für SNF werden aus der KBA-Statistik abgeleitet. Es wird zwar nicht zwischen den Antriebstechnologien differenziert, jedoch werden Größenklassen unterschieden. Es werden vier Überlebenskurven (LKW < 4,5 t, LKW 7,5-12 t, LKW > 12 t sowie Sattel- und Lastzüge) unterschieden, wobei alle Kurven unverändert über den gesamten Szenariozeitraum angenommen werden. Die Überlebenskurven sind in Tabelle 55 angegeben.

Tabelle 55: Überlebenswahrscheinlichkeiten der LNF und SNF nach Größenklasse im Trend-Szenario

	LNF ab 2018	RT <7,5t ab 2018	RT 7,5-12t ab 2018	RT >12t ab 2018	TT/AT ab 2018
0	1	1	1	1	1
-1	0,973	0,956	0,953	0,960	0,995
-2	0,952	0,927	0,918	0,931	0,964
-3	0,926	0,893	0,877	0,894	0,855
-4	0,894	0,857	0,829	0,850	0,701
-5	0,858	0,818	0,776	0,802	0,551
-6	0,819	0,778	0,721	0,749	0,447
-7	0,776	0,737	0,663	0,694	0,357
-8	0,730	0,695	0,604	0,636	0,276
-9	0,682	0,653	0,546	0,578	0,211
-10	0,634	0,611	0,489	0,521	0,162
-11	0,588	0,574	0,437	0,467	0,130

	LNF ab 2018	RT <7,5t ab 2018	RT 7,5-12t ab 2018	RT >12t ab 2018	TT/AT ab 2018
-12	0,542	0,538	0,388	0,416	0,107
-13	0,497	0,503	0,342	0,368	0,088
-14	0,453	0,470	0,300	0,323	0,073
-15	0,411	0,438	0,262	0,282	0,061
-16	0,372	0,408	0,227	0,245	0,052
-17	0,334	0,380	0,197	0,211	0,045
-18	0,300	0,353	0,171	0,182	0,039
-19	0,268	0,329	0,149	0,157	0,035
-20	0,240	0,306	0,130	0,136	0,031
-21	0,214	0,285	0,114	0,118	0,027
-22	0,191	0,266	0,101	0,103	0,024
-23	0,171	0,249	0,091	0,091	0,022
-24	0,154	0,233	0,083	0,081	0,020
-25	0,139	0,219	0,077	0,074	0,019
-26	0,127	0,206	0,072	0,069	0,017
-27	0,117	0,195	0,069	0,065	0,015
-28	0,108	0,185	0,068	0,062	0,006
-29	0,102	0,177	0,067	0,061	0,006
-30	0,097	0,170	0,067	0,060	0,005

Anmerkung: Die Tabelle zeigt den Anteil der Fahrzeuge, die nach x-Jahren noch im Bestand sind, bezogen auf das Neufahrzeug (Alter 0)

Quelle: eigene Auswertung anhand KBA-Statistik

3.4.4 Busse

Die Neuzulassungen der Linien- und Reisebusse sind in Tabelle 34 dargestellt. Von 2010 bis 2018 nahmen die Neuzulassungen der Busse deutlich zu. Für das Trendszenario in Anlehnung an die Fahrleistungsentwicklung angenommen, dass die Neuzulassungen der Busse nahezu konstant bleiben. Lediglich bei den Fernlinienbussen werden leicht ansteigende Zulassungszahlen angenommen.

Tabelle 56: Anzahl jährlicher Neuzulassungen der Busse im Trendszenario

Baujahr	Busse gesamt	Nahlinienbusse	Fernlinienbusse	Sonstige Reisebusse
2010	5.216			
2017	6.650			
2018	6.687	4.014	207	2,466

Baujahr	Busse gesamt	Nahlinienbusse	Fernlinienbusse	Sonstige Reisebusse
2019-2030	5.800	3.500	100	2.200
2031-2040	5.810	3.500	110	2.200
2041-2050	5.820	3.500	120	2.200

Quelle: bis 2018 Auswertung von KBA-Daten und Flixbus, Aufteilung Nah-, Fernlinien- und Reisebusse auf Basis von KBA-Merkmalen und Flixbus-Daten geschätzt (Flixbus Flotte 12/2018:197 Busse Baujahr 2018 zgl. 5% für sonstige Fernbusunternehmen), nach 2018 eigene Annahmen

Für die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der alternativen Antriebsarten von Bussen wurde ähnlich wie bei den SNF vorgegangen und folgende Aspekte berücksichtigt:

- ▶ Heute verfügbare Technologien und Marktreife: Elektrische Stadtbusse werden in den letzten Jahren immer mehr eingesetzt. Verschiedene Städte in Deutschland betreiben bereits solche Busse im kleinen Maßstab. Einige Städte wie z.B. München, Hamburg und Wiesbaden kündigen den Umstieg auf 100 % emissionsfreie Busse in wenigen Jahren an, was im Ausland schon vereinzelt, z.B. Eindhoven, NL oder Shenzhen, China der Fall ist. Mehrere europäische Hersteller kündigen Serienproduktion ab 2020 an (T&E 2018). Aktuell sind verschiedene Systeme, darunter batterieelektrische Busse, als sog. Nacht- oder aber Gelegenheitslader, Oberleitungsbusse, oder Brennstoffzellenbusse denkbar, wobei letztere bisher nur im Pilotmaßstab betrieben werden. Für den Fernlinienverkehr wurde vom Anbieter Flixbus in 2018 eine erste Strecke Mannheim-Frankfurt-Flughafen mit einem batterie-elektrischen Bus in Betrieb genommen, jedoch aufgrund technischer Probleme Ende 2019 wieder eingestellt. Vereinzelt Städte setzten in den letzten Jahren verstärkt auf CNG-Busse, die Entwicklung ist aber eher stagnierend bis rückläufig.
- ▶ Quoten bzw. Anrechnung zu den CO₂-Grenzwerten von SNF: Das EU-Parlament (ENVI 2018) schlug im Rahmen der Erarbeitung von CO₂-Grenzwerten für SNF eine Mindestquote für Null-Emissions-Busse von 50 % im Jahr 2025 und 75 % im Jahr 2030 vor, wobei keine genauere Einschränkung auf eine konkrete Antriebstechnologie erfolgt. Dabei wird auch die Argumentation der fortgeschrittenen Marktreife und des hohen Handlungsdrucks für die Innenstädte zur Problematik der Luftreinhaltung angeführt. Die aktuelle Verordnung (EU) 2019/1242 beinhaltet derzeit jedoch keine Anrechnung von Null-Emissions-Bussen, bis zum Jahr 2022 soll die EU-Kommission jedoch hierzu Bericht erstatten, um eventuelle Anpassungen in der Verordnung vornehmen zu können.

Für das Trendszenario wird angenommen, dass sich batterieelektrische Linienbusse langfristig durchsetzen (50% in 2030, 100% in 2050), die vom EU-Parlament vorgeschlagenen Mindestquoten werden aber nicht erfüllt, da die aktuelle Diskussion in der EU noch keine klaren Tendenzen zeigt. Bei den Reisebussen erfolgt die Einführung nur vereinzelt, hierbei kommen neben rein elektrischen Bussen auch PHEV zum Einsatz. CNG-Linienbusse bleiben eine Nischenanwendung, die zukünftig zurückgeht. Linienbusse mit Diesel-Hybrid-Antrieb haben nur geringe Anteile an den Neuzulassungen und werden im Szenario nicht weiter berücksichtigt. Die Entwicklung nach Antriebsarten zeigt Tabelle 57.

Tabelle 57: Anteil der Neuzulassungen der Linien- und Reisebusse im Trendszenario nach Antriebsart

Baujahr	Diesel (inkl. Hybrid)	CNG	BEV
Nahlinienbusse			
2017	98,6%	1,0%	0,4%
2018	97,8%	1,1%	1,1%
2020	97,0%	1,0%	2,0%
2030	50,0%	0%	50,0%
2050	0,0%	0%	100,0%
Fernlinien- und Reisebusse			
2017	100,0%	0%	0,0%
2018	100,0%	0%	0,0%
2020	99,9%	0%	0,1%
2030	99,0%	0%	1,0%
2050	96,0%	0%	4,0%

Quelle: bis 2018 Auswertung von KBA-Daten, ab 2020 eigenen Annahmen

Die Überlebenskurven für Busse werden nach Größenklassen und Einsatzgebiet unterschieden. Es werden zwei Überlebenskurven für Reise-/Fernbusse angegeben und drei für städtische Linienbusse. Alle Kurven werden unverändert über den gesamten Szenariozeitraum angenommen. Die Überlebenskurven sind in Tabelle 58 angegeben.

Tabelle 58: Überlebenswahrscheinlichkeiten der Busse nach Bustyp und Größenklasse im Trend-Szenario

Comment	Coach Std <=18t ab 2018	Coach 3-Axes >18t ab 2018	Ubus Midi <=15t ab 2018	Ubus Std >15-18t ab 2018	Ubus Artic >18t ab 2018
0	1	1	1	1	1
-1	0,974	0,930	0,987	0,999	0,997
-2	0,952	0,885	0,974	0,999	0,994
-3	0,923	0,835	0,955	0,997	0,989
-4	0,885	0,780	0,928	0,995	0,982
-5	0,841	0,724	0,893	0,990	0,971
-6	0,789	0,667	0,849	0,984	0,957
-7	0,733	0,609	0,796	0,974	0,938
-8	0,671	0,554	0,735	0,959	0,914
-9	0,607	0,500	0,666	0,939	0,884
-10	0,542	0,448	0,593	0,911	0,849

Comment	Coach Std <=18t ab 2018	Coach 3-Axes >18t ab 2018	Ubus Midi <=15t ab 2018	Ubus Std >15- 18t ab 2018	Ubus Artic >18t ab 2018
-11	0,478	0,402	0,520	0,877	0,811
-12	0,417	0,360	0,447	0,832	0,767
-13	0,358	0,321	0,376	0,775	0,718
-14	0,304	0,285	0,310	0,707	0,663
-15	0,254	0,253	0,250	0,629	0,605
-16	0,210	0,224	0,199	0,541	0,544
-17	0,172	0,199	0,156	0,449	0,482
-18	0,139	0,177	0,123	0,357	0,420
-19	0,112	0,157	0,098	0,271	0,361
-20	0,091	0,140	0,081	0,196	0,306
-21	0,073	0,126	0,070	0,136	0,256
-22	0,060	0,114	0,064	0,093	0,212
-23	0,051	0,104	0,061	0,066	0,175
-24	0,044	0,096	0,061	0,051	0,145
-25	0,039	0,090	0,063	0,045	0,122
-26	0,036	0,084	0,066	0,044	0,105
-27	0,035	0,081	0,069	0,045	0,094
-28	0,034	0,078	0,073	0,047	0,087
-29	0,035	0,076	0,077	0,050	0,083
-30	0,035	0,075	0,081	0,052	0,083

Anmerkung: Die Tabelle zeigt den Anteil der Fahrzeuge, die nach x-Jahren noch im Bestand sind, bezogen auf das Neufahrzeug (Alter 0)

Quelle: eigene Auswertung anhand KBA-Statistik

3.4.5 Motorisierte Zweiräder

Die Neuzulassungen der Krafträder, Kleinkrafträder und Pedelecs sind in Tabelle 59 dargestellt. Von 2010 bis 2018 nahmen die Neuzulassungen der Krafträder leicht zu, bei den Kleinkrafträdern wird angenommen, dass diese konstant blieben.

Für das Trendszenario wird in Anlehnung an die Fahrleistungsentwicklung angenommen, dass die Neuzulassungen zukünftig konstant bleiben.

Tabelle 59: Anzahl jährlicher Neuzulassungen motorisierter Zweiräder im Trendszenario (in Tausend Fahrzeugen)

Baujahr	Krafträder	Kleinkrafträder	Pedelecs
2010	138	50	k.a.

Baujahr	Krafträder	Kleinkrafträder	Pedelecs
2017	144	50	720
2018	158	50	720
2030	144	50	720
2050	144	50	720

Quelle: bis 2018 Auswertung von KBA-Daten zu Krafträdern, Daten zu Kleinkrafträdern und Pedelecs anhand zusätzlicher Quellen geschätzt, nach 2018 eigene Annahmen

Es wird angenommen, dass bei der Anteil elektrischer Zweiräder zukünftig ansteigt. Bei Kleinkrafträdern, z.B. Roller, wird eine stärkere Elektrifizierung unterstellt (siehe Tabelle 60).

Tabelle 60: Anteil der Neuzulassungen motorisierter Zweiräder im Trendszenario nach Antriebsart

Baujahr	Krafträder		Kleinkrafträder	
	Otto	BEV	Otto	BEV
2017	99,3%	0,7%	96,0%	4,0%
2018	99,3%	0,7%	96,0%	4,0%
2020	99,0%	1,0%	95,0%	5,0%
2030	95,0%	5,0%	70,0%	30,0%
2050	80,0%	20,0%	0,0%	100,0%

Quelle: bis 2018 Auswertung von KBA-Daten zu Krafträdern, eigene Annahmen für Kleinkrafträder, ab 2020 eigenen Annahmen

Bei den Überlebenskurven der Krafträder besteht kein Anpassungsbedarf, daher wurden die für TREMOD 5.63 abgeleiteten Kurven beibehalten.

3.5 Entwicklung der Energieeffizienz

Die Verbesserung der Energieeffizienz der Fahrzeuge ist eine wichtige Randbedingung zur Reduzierung der verkehrsbedingten Kohlendioxidemissionen. Initiativen der europäischen Automobilindustrie (Selbstverpflichtungserklärung zur Absenkung der spezifischen CO₂-Emissionen der Pkw bis 2009) brachten nicht den gewünschten Erfolg. Die EU beschloss daraufhin gesetzliche Regelungen für neu zugelassene Pkw (EU-RL 443/2009) und leichte Nutzfahrzeuge (EU-RL 510/2011). Eine Fortschreibung wurde im Februar 2014 von EU-Parlament verabschiedet (EU-RL 333/2014).

Aktuell werden auf EU-Ebene Grenzwerte für PKW und LNF sowie SNF für den Zeitraum 2021 bis 2030 erarbeitet. Die konkreten Vorschläge werden für das Trendszenario analysiert und in den jeweiligen folgenden Kapiteln erläutert.

Für die übrigen Fahrzeugkategorien und die anderen Verkehrsträger gibt es bisher keine gesetzlichen Bestimmungen zur Reduzierung des fahrzeugseitigen Energieverbrauchs. Es gibt allerdings Minderungsziele großer Unternehmen, z.B. der DB AG, die sich zu bestimmten Minderungszielen verpflichtet haben. Diese beinhalten in der Regel nicht nur reine fahrzeugtechnische Maßnahmen.

Für den Zeitraum von 2030 bis 2050 liegen aktuell keine offiziellen Ziele zur Regulation der Energieeffizienz vor. Die Entwicklungen in diesem Zeitraum müssen durch eigene Annahmen, z.B. auf Basis der bisherigen Entwicklung und zu erwartenden Minderungspotenzialen, abgeschätzt werden.

3.5.1 Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

Gemäß den Daten des CO₂-Monitoring (im NEFZ) sind die durchschnittlichen CO₂-Emissionen in Deutschland seit 1990 bis zum Jahr 2016 stetig gesunken. Seit 2017 ist jedoch ein leichter Anstieg erkennbar ((KBA n.d.), der sich 2018 fortgesetzt hat (siehe Tabelle 62 sowie Tabelle 19 auf Seite 53). Dies ist in erster Linie auf den gestiegenen Anteil leistungsstarker Fahrzeuge (insb. SUV) zurückzuführen. Im Trendszenario wird angenommen, dass die Vorgaben der europäischen CO₂-Grenzwertgesetzgebung für PKW und LNF bis 2020, 2025 und 2030 eingehalten werden. Um diese Grenzwerte nicht zu überschreiten, ist zum einen eine Verbrauchsverbesserung der konventionellen Fahrzeuge nötig und zum anderen der Anteil von Elektrofahrzeugen (BEV und PHEV) an den Neuzulassungen zu erhöhen.

Tabelle 61 gibt einen Überblick der Verbrauchsverbesserungen von Pkw und LNF mit Verbrennungsmotoren. Für alle aufgeführten Antriebstechnologien gelten dieselben Verbesserungsraten. Für den elektrischen Antriebsstrang von PHEV und rein elektrische Fahrzeuge (BEV) sind analog zum HBEFA 4.1 keine Verbrauchsverbesserungen angenommen. Hintergrund ist, dass zwar Effizienzsteigerungen im Antriebsstrang und in weiteren Bereichen zu erwarten sind, jedoch diese Vorteile durch größere Batterien und Fahrzeugmaße kompensiert werden.

Tabelle 61: Jährliche Verbrauchsminderung in den Fahrzyklen von Pkw und LNF mit Verbrennungsmotor (Otto, Diesel, LPG, CNG und PHEV)

Zeitraum	Pkw	LNF
2019-2020	2,3 % p.a.	2,1 % p.a.
2021-2025	1,6 % p.a.	1,6 % p.a.
2026-2050	1,4 % p.a.	1,4 % p.a.

Quelle: Vorschlag TU Graz für HBEFA 4.1

Ausgehend vom CO₂-Wert der Pkw-Neuzulassungen des Jahres 2018 werden die o.g. Effizienzsteigerungen im Fahrzyklus angenommen. Bei der Entwicklung wird davon ausgegangen, dass die Größenverteilung konstant bleibt, sodass der Effekt der Verbrauchssteigerung durch größere Fahrzeuge ausbleibt. Bei LNF werden die spezifischen Emissionen der Neuzulassungen das Jahres 2017 als Referenzjahr herangezogen und ausgehend hiervon die prozentuale Verbesserung angenommen. Für die CO₂-Emissionen im Realbetrieb werden dieselben prozentualen Unterschiede zum jeweils geltenden Prüfzyklus wie im HBEFA 4.1 angenommen. Die aus diesen Annahmen abgeleiteten zukünftigen Typprüfwerte und der Zuschlag für den Realverbrauch gegenüber den Prüfzyklen ist in Tabelle 62 für Pkw und in Tabelle 63 für LNF für die Fahrzeugkonzepte mit den höchsten Zulassungsanteilen angegeben.

Tabelle 62: Typprüfwerte und Zuschläge für den Realverbrauch von Pkw gegenüber den Typprüfwerten NEFZ (bis 2020) und WLTP (ab 2021)

	Otto CO ₂ (g/km) Prüfzyklus	Otto Zuschlag Realverbrauch	Diesel CO ₂ (g/km) Prüfzyklus	Diesel Zuschlag Realverbrauch	PHEV-Benzin CO ₂ (g/km) Prüfzyklus	PHEV-Benzin Zuschlag Realverbrauch
2017	127,6	36%	132,1	42%	45,8	53%
2018	130,6	36,5%	135,2	42,5%	46,9	53,4%
2019	127,6	37,0%	132,1	43,0%	45,8	53,9%
2020	124,7	37,5%	129,0	43,5%	44,7	54,4%
2021	147,2	14,6%	152,4	19,6%	52,8	21%
2022	144,9	14,9%	149,9	19,9%	52,0	21,4%
2023	142,6	15,2%	147,5	20,2%	51,1	21,7%
2024	140,3	15,5%	145,2	20,5%	50,3	22,0%
2025	138,3	15,8%	143,1	20,8%	49,5	22,3%
2026	136,4	16,1%	141,1	21,1%	48,8	22,6%
2027	134,5	16,4%	139,2	21,4%	48,1	22,9%
2028	132,6	16,7%	137,2	21,7%	47,5	23,2%
2029	130,7	17,0%	135,3	22,0%	46,8	23,5%
2030	128,9	17,2%	133,4	22,2%	46,1	23,7%
2031	127,1	17,4%	131,5	22,4%	45,5	23,9%
2032	125,3	17,6%	129,7	22,6%	44,9	24,1%
2033	123,6	17,8%	127,9	22,8%	44,2	24,3%
2034	121,8	18,0%	126,1	23,0%	43,6	24,5%
2035	120,1	18,1%	124,3	23,1%	43,0	24,6%
2036	118,4	18,2%	122,6	23,2%	42,4	24,7%
2037	116,8	18,3%	120,9	23,3%	41,8	24,8%
2038	115,2	18,4%	119,2	23,4%	41,2	24,9%
2039	113,5	18,5%	117,5	23,5%	40,6	25,0%
2040	112,0	18,6%	115,9	23,6%	40,1	25,1%
2041	110,4	18,7%	114,2	23,7%	39,5	25,2%
2042	108,8	18,8%	112,6	23,8%	39,0	25,3%
2043	107,3	18,9%	111,1	23,9%	38,4	25,4%
2044	105,8	19,0%	109,5	24,0%	37,9	25,5%
2045	104,3	19,1%	108,0	24,1%	37,3	25,6%

	Otto CO ₂ (g/km) Prüfzyklus	Otto Zuschlag Realverbrauch	Diesel CO ₂ (g/km) Prüfzyklus	Diesel Zuschlag Realverbrauch	PHEV-Benzin CO ₂ (g/km) Prüfzyklus	PHEV-Benzin Zuschlag Realverbrauch
2046	102,9	19,2%	106,5	24,2%	36,8	25,7%
2047	101,4	19,3%	105,0	24,3%	36,3	25,8%
2048	100,0	19,4%	103,5	24,4%	35,8	25,9%
2049	98,6	19,5%	102,1	24,5%	35,3	26,0%
2050	97,2	19,6%	100,6	24,6%	34,8	26,1%

Quelle: Vorschlag TU Graz für HBEFA 4.1 (Stand August 2019)

Tabelle 63: Typprüfwerte und Zuschläge für den Realverbrauch von LNF gegenüber den Typprüfwerten NEFZ (bis 2020) und WLTP (ab 2021)

	Otto CO ₂ (g/km) Prüfzyklus	Otto Zuschlag Realverbrauch	Diesel CO ₂ (g/km) Prüfzyklus	Diesel Zuschlag Realverbrauch	PHEV-Benzin CO ₂ (g/km) Prüfzyklus	PHEV-Benzin Zuschlag Realverbrauch
2017	173,0	27,0%	174,4	27,0%	153,3	27,0%
2018	169,4	27,5%	170,8	27,0%	150,8	27,5%
2019	165,8	28,0%	167,2	27,0%	148,4	28,0%
2020	162,3	28,5%	163,7	27,0%	146,0	28,5%
2021	183,7	11,7%	185,2	10,4%	165,2	11,7%
2022	180,8	12,0%	182,3	10,7%	162,6	12,0%
2023	177,9	12,3%	179,3	11,0%	160,0	12,3%
2024	175,0	12,6%	176,5	11,3%	157,4	12,6%
2025	172,6	12,9%	174,0	11,6%	154,9	12,9%
2026	170,2	13,2%	171,6	11,9%	152,7	13,2%
2027	167,8	13,5%	169,2	12,2%	150,6	13,5%
2028	165,4	13,8%	166,8	12,5%	148,5	13,8%
2029	163,1	14,1%	164,5	12,8%	146,4	14,1%
2030	160,8	14,3%	162,2	13,0%	144,4	14,3%
2031	158,6	14,5%	159,9	13,2%	142,3	14,5%
2032	156,3	14,7%	157,7	13,4%	140,4	14,7%
2033	154,2	14,9%	155,4	13,6%	138,4	14,9%
2034	152,0	15,1%	153,3	13,8%	136,5	15,1%
2035	149,9	15,2%	151,1	13,9%	134,5	15,2%
2036	147,8	15,3%	149,0	14,0%	132,7	15,3%
2037	145,7	15,4%	146,9	14,1%	130,8	15,4%

	Otto CO ₂ (g/km) Prüfzyklus	Otto Zuschlag Realverbrauch	Diesel CO ₂ (g/km) Prüfzyklus	Diesel Zuschlag Realverbrauch	PHEV-Benzin CO ₂ (g/km) Prüfzyklus	PHEV-Benzin Zuschlag Realverbrauch
2038	143,7	15,5%	144,9	14,2%	129,0	15,5%
2039	141,7	15,6%	142,8	14,3%	127,2	15,6%
2040	139,7	15,7%	140,8	14,4%	125,4	15,7%
2041	137,7	15,8%	138,9	14,5%	123,6	15,8%
2042	135,8	15,9%	136,9	14,6%	121,9	15,9%
2043	133,9	16,0%	135,0	14,7%	120,2	16,0%
2044	132,0	16,1%	133,1	14,8%	118,5	16,1%
2045	130,2	16,2%	131,3	14,9%	116,9	16,2%
2046	128,3	16,3%	129,4	15,0%	115,2	16,3%
2047	126,5	16,4%	127,6	15,1%	113,6	16,4%
2048	124,8	16,5%	125,8	15,2%	112,0	16,5%
2049	123,0	16,6%	124,1	15,3%	110,4	16,6%
2050	121,3	16,7%	122,3	15,4%	108,9	16,7%

Quelle: Vorschlag TU Graz für HBEFA 4.1 (Stand August 2019)

3.5.2 SNF, Busse und motorisierte Zweiräder

Mit der am 20. Juni 2019 veröffentlichten Verordnung (EU) 2019/1242 liegt erstmals eine CO₂-Grenzwertgesetzgebung für neue SNF vor. (siehe(EU 2019)). Daraus geht hervor, dass für schwere Nutzfahrzeuge eine Minderung der spezifischen CO₂-Emissionen (g CO₂/tkm) bis 2025 um 15 % und bis 2030 um 30 % bis 35 %) gegenüber 2019 erzielt werden soll. Die Gesetzgebung soll zunächst für die SNF-Klassen 4, 5, 9 und 10 analog zum CO₂-Monitoring der EU erfolgen, welche ca. 80 % der CO₂-Emissionen der SNF-Klassen in Europa verursachen.

Die konkrete Ausgestaltung der Grenzwerte ist noch nicht final geklärt. Bis zum 31. Dezember 2022 soll die EU-Kommission zu folgenden Punkte Bericht erstatten:

- ▶ Wirksamkeit der Verordnung
- ▶ die ab 2030 geltende CO₂-Emissionsreduktionszielvorgabe
- ▶ den Umfang der Anreizmechanismen für emissionsfreie und emissionsarme schwere Nutzfahrzeuge
- ▶ die Festlegung von CO₂-Emissionsreduktionszielvorgaben für andere Arten schwerer Nutzfahrzeuge einschließlich Anhängern, Bussen und Arbeitsfahrzeugen, sowie
- ▶ die Einführung verbindlicher CO₂-Emissionsreduktionszielvorgaben für schwere Nutzfahrzeuge ab 2035 und 2040.

Die Umsetzung für das TREMOD Trendszenario umfasst folgende Annahmen:

- ▶ Eine Minderung von 30 % bis 2030 gegenüber 2019 muss im CO₂-Monitoring erreicht werden, real werden aber nur ca. 26 % Minderung erreicht, da die Herstellerangaben für das CO₂-Monitoring –wenn auch in begrenztem Umfang – eine Optimierung auf das vorgegebene Prüfverfahren zulassen und Spezialfahrzeuge ausgenommen werden.
- ▶ Die Minderungen werden pauschal für alle SNF angenommen: eine Unterscheidung in LKW und Sattelzüge, Größenklassen und Straßenkategorie findet aus vereinfachten Gründen nicht statt.
- ▶ Busse werden analog zum CO₂-Monitoring verspätet in die Grenzwertgesetzgebung aufgenommen. Reisebusse erbringen dieselben Minderungen wie SNF, Linienbusse etwas geringere Minderungen.

Tabelle 64: Jährliche Reduktion des spezifischen Kraftstoffverbrauchs bei SNF- und Bussen (Diesel, CNG, LNG sowie HEV) im Trendszenario

Zeitraum LKW und Sattelzüge (Busse)	LKW und Sattelzüge	Nahlinienbusse	Fernlinien- und Reisebusse
2014-2018 (2014-2022)	-1,0% p.a.	-0,5% p.a.	-1,0% p.a.
2019-2025 (2023-2028)	-2,3% p.a.	-1,3% p.a.	-2,3% p.a.
2026-2030 (2029-2033)	-3,2% p.a.	-1,5% p.a.	-3,2% p.a.
2031-2050 (2034-2050)	-1,0% p.a.	-0,5% p.a.	1,0% p.a.
2014-2030 insgesamt	-29,7%	-13,8%	-29,7%
2014-2050 insgesamt	-42,5%	-24,6%	-42,5%

Quelle: Eigene Annahmen für TREMOD 6.0 und HBEFA 4.1

Für Elektro-Fahrzeuge werden wie im HBEFA 4.1 keine Minderungen angenommen, da eine Entwicklung dieser Technologie, insbesondere die Auslegung der Fahrzeuge (z.B. Fahrzeug- und Batterigrößen) schwer abschätzbar ist.

Für die motorisierten Zweiräder liegen keine Informationen zu Minderungspotenzialen und einer zukünftigen Regulierung vor. Vereinfacht wird in TREMOD angenommen, dass der spezifische Kraftstoffverbrauch auch im Trendszenario konstant bleibt.

3.5.3 Schienenverkehr

Durch die Einführung neuer Fahrzeuge (z.B.: ICE 3, ICE 4, moderne Triebwagen im Personennahverkehr) wurden im Schienenverkehr in den vergangenen Jahren Effizienzverbesserungen erreicht, v.a. durch Gewichtseinsparung und Stromrückspeisung. Es wird angenommen, dass künftig weitere Effizienzsteigerungen erzielt werden können, Es werden daher für die Elektrotraktion die Einschätzung des Bahn-Umwelt-Zentrums [DB AG, 2007] übernommen, wonach sich der Energieverbrauch je Triebfahrzeugkilometer beim Personenverkehr bis 2030 um 20 % gegenüber 2005 verringern könnte. Beim Güterverkehr wird eine 20%ige Minderung insgesamt (Fahrzeuge, Betrieb und Auslastung) erreicht. Bei Dieselfahrzeugen ist die Minderung geringer.

Diese Vorgaben werden für das Trendszenario wie folgt übernommen:

- ▶ Absenkung des spezifischen Energieverbrauchs je Platz-km bei der Elektrotraktion um 1 % pro Jahr bis 2030 ab 2017, 0,5 % bei der Dieseltraktion
- ▶ Im Güterverkehr: Minderung des spezifischen Energieverbrauchs je Tonnenkilometer von 2017 bis 2030 bei der Elektrotraktion um 1 % pro Jahr, bei der Dieseltraktion um 0,5 % pro Jahr. Dies wird modelliert durch Absenkung des spezifischen Energieverbrauchs je angebotenen Tonnenkilometer bei unveränderter Auslastung.
- ▶ Von 2030 bis 2050 wird bei allen Traktionsarten von einer weiteren Minderung um 0,5 % pro Jahr angenommen.

3.5.4 Binnenschifffahrt

Für die Binnenschifffahrt wurden im Vorhaben (Heidt et al. 2016)) Annahmen für die Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs abgeleitet. Grundlage sind Potenzialabschätzungen der Zentralkommissionen für die Rheinschifffahrt (ZKR) zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Binnenschifffahrt. Hierzu wurden im Bericht der ZKR unter Berücksichtigung des aktuellen Entwicklungsstandes und der Wirtschaftlichkeit von möglichen Maßnahmen verschiedene Szenarien abgeleitet. Folgende Maßnahmenpakete zur Senkung des Kraftstoffverbrauches wurden hierbei unterschieden:

- ▶ technische Maßnahmen (z.B. verbesserte Motoren und Propeller)
- ▶ operative Maßnahmen (z.B. Optimierung der Reiseplanung)
- ▶ Zunahme der mittleren Tragfähigkeit (Schiffsgröße)

Für die technischen und operativen Maßnahmen wurde für ein konservatives Szenario insgesamt eine jährliche Reduktion des spezifischen Kraftstoffverbrauches in g/tkm um durchschnittlich 0,75 % geschätzt.

Eine Zunahme der mittleren Tragfähigkeit wird in TREMOD ebenfalls angenommen. Jedoch ergibt sich hierdurch im Gegensatz zu den Abschätzungen der ZKR kein nennenswerter Effekt für die Energieeffizienz, da bei den berücksichtigten Tragfähigkeitsklassen (<1500 t, 1500 - 3000 t, 3000 t) mit den TREMOD-Daten kein eindeutiger Verbrauchsvorteil größerer Schiffsklassen festgestellt wurde.

Als alternative Kraftstoffe für die Binnenschifffahrt wurde bisher nur LNG betrachtet. Es wird angenommen, dass der Anteil von LNG-Schiffen nach 2035 konstant bleibt. Die zugrundeliegenden Annahmen zur Senkung des spezifischen Energieverbrauchs sind analog zu Dieselschiffen.

3.5.5 Flugverkehr

Für den Flugverkehr wurde vom Umweltbundesamt eine Verminderung des spezifischen Kraftstoffverbrauches von 1 % pro Jahr bis 2030 bezogen auf die Betriebsleistung (angebotene Nutzlast) angesetzt (UBA 2005). Dieser Wert wird in TREMOD für den gesamten Zeitraum bis 2050 übernommen und deckt sich mit aktuelleren Abschätzungen der Internationalen Luftverkehrs-Vereinigung IATA, welche ein Absenkungspotenzial im Bereich von 0,7 bis 1,2 % p.a. bis zum Jahr 2050 angibt (IATA 2013). Eine Differenzierung nach Flugzeugtypen und Verkehrsbeziehungen findet nicht statt.

3.6 Entwicklung der spezifischen Emissionen

3.6.1 Abgasgesetzgebung Straßenverkehr

Die zukünftige Entwicklung der gesetzlich limitierten Emissionen wird aufgrund der bis Mitte 2018 beschlossenen Grenzwerte abgeleitet.

Insbesondere die Euro-6 bzw. Euro-VI-Werte erfordern hohe Minderungen bei den NO_x und Partikel-Emissionen der Diesel-Kfz. Konkret verlangen die Grenzwerte folgende Absenkungen:

- ▶ Diesel-Pkw und LNF: Absenkung der Partikelmasse auf 5 mg/km bei Euro-5 und Euro-6; Reduktion der NO_x-Emissionen um 20 % (Euro-5) bzw. 68 % (Euro-6) gegenüber Euro-4.
- ▶ SNF Euro-VI: Reduktion der Partikelmasse um 60 % gegenüber Euro-V; Reduktion der NO_x-Emissionen um 80 % gegenüber Euro-V.

In den letzten Jahren hat das Thema Realemissionen (real-world emissions) in der Abgasgesetzgebung zunehmend an Bedeutung gewonnen. Für schwere Nutzfahrzeuge sind bereits ab Euro VI zusätzlich zum Prüfstand Messungen im Realbetrieb (sog. in-service-tests) vorgesehen. Für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge gilt ab dem Jahr 2017 die RDE (Real Driving Emissions)-Gesetzgebung. Diese gibt sog. Konformitätsfaktoren (CF) vor, um welche die Emissionen im Realbetrieb „unter normalen Bedingungen“ maximal über dem Grenzwert im NEFZ liegen dürfen. Die Anforderungen für Euro 6-Pkw werden stufenweise verschärft (siehe Tabelle 36). Einem Urteils des europäischen Gerichtshof im 13. Dezember 2018 zufolge müssen die Konformitätsfaktoren zukünftig gänzlich entfallen bzw. bei Faktor 1 liegen. Der Umsetzungstermin hierfür wurde jedoch noch nicht beschlossen.

Tabelle 65: RDE-Abgasgesetzgebung für PKW

Abgasnorm	Einführung Neufahrzeuge	Letztmögliche Zulassung	Konformitätsfaktor
Euro 6 b	01.09.2015	31.08.2018	-
Euro 6 c	01.09.2018	31.08.2019	-
Euro 6 d-temp	01.09.2019	31.12.2020	NO _x : 2,1, PN:1,5
Euro 6 d	01.01.2021		NO _x : 1,5, PN:1,5

Quelle: [Europäische Kommission, 2015]; (KBA, 2016). Ergänzung: Einführungszeiträume für leichte Nutzfahrzeuge jeweils ein Jahr später

3.6.1.1 Einführungszeiträume bei Pkw

Im Jahr 2017 waren 100 % der neu zugelassenen Otto- und Diesel-Pkw Euro-6 (Quelle: KBA). Ab 2017 wird durch das neue RDE-Messverfahren eine sukzessive Absenkung des Emissionsniveaus bei Neufahrzeugen erwartet, die in TREMOD durch unterschiedliche Anteile von Euro 6d-temp und Euro 6d an den Neuzulassungen abgebildet wird.

Tabelle 66: Anteile Eurostufen an den Neuzulassungen bei Pkw

	Otto Euro-5	Otto Euro-6 a,b	Otto Euro-6 c	Otto Euro-6 d-temp	Otto Euro-6 d	Diesel Euro-5	Diesel Euro-6 a,b	Diesel Euro-6 c	Diesel Euro 6dtemp	Diesel Euro-6d

	Otto Euro-5	Otto Euro-6 a,b	Otto Euro-6 c	Otto Euro-6 d-temp	Otto Euro-6 d	Diesel Euro-5	Diesel Euro-6 a,b	Diesel Euro-6 c	Diesel Euro 6dtemp	Diesel Euro-6d
2011	100%	0%				99%	1%			
2012	99%	1%				98%	2%			
2013	88%	12%				94%	6%			
2014	71%	29%				76%	24%			
2015	24%	76%				29%	71%			
2016		100%					100%			
2017		90%	10%	n.a.			90%	10%		
2018		70%	4%	25%			65%	12%	24%	
2019			45%	50%	5%			45%	50%	5%
2020				80%	20%				80%	20%
2021				10%	90%				10%	90%
2022-2050					100%					100%

Anmerkungen: Bis 2018 KBA, danach Annahmen

3.6.1.2 Einführungszeiträume bei leichten Nutzfahrzeugen

Laut KBA-Statistik gab es bei den LNF in der Vergangenheit keine bzw. nur geringe Anzahl an vor Inkrafttreten des Grenzwerts eingeführten Fahrzeugen. 2017 lag der Anteil der Euro-6-Fahrzeuge bei 100 %. Daher erfolgt die Einführung der Euro-6d-temp/d-Fahrzeuge auch im Szenario später als bei den Pkw.

Tabelle 67: Anteile Eurostufen an den Neuzulassungen bei den leichten Nutzfahrzeugen

	Otto Euro-5	Otto Euro-6 a,b	Otto Euro-6 c	Diesel Euro 6 d-temp	Diesel Euro-6 d	Diesel Euro-5	Diesel Euro-6 a,b	Diesel Euro-6 c	Diesel Euro 6dtemp	Diesel Euro-6d
2013	99%	1%					100%	0%		
2014	93%	7%					99%	1%		
2015	62%	38%					96%	4%		
2016	6%	94%					61%	39%		
2017		100%					100%			
2018		90%	3%	7%			99%	0%	1%	
2019		75%	20%	5%			75%	20%	5%	
2020			45%	50%	5%			45%	50%	5%
2021				80%	20%				80%	20%

	Otto Euro-5	Otto Euro-6 a,b	Otto Euro-6 c	Diesel Euro 6 d-temp	Diesel Euro-6 d	Diesel Euro-5	Diesel Euro-6 a,b	Diesel Euro-6 c	Diesel Euro 6dtemp	Diesel Euro-6d
2022				10%	90%				10%	90%
2023-2050					100%					100%

Anmerkungen: Bis 2018 KBA, danach Annahmen

3.6.1.3 Einführungszeiträume bei schweren Nutzfahrzeugen

Laut KBA-Statistik erfüllen schwere Nutzfahrzeuge, die vorzugsweise im Fernverkehr eingesetzt werden, in der Regel früher neue Grenzwerte, da sie z.B. Kostenvorteile bei der Lkw-Maut haben. Dies lässt sich z.B. bei den Euro-VI-Fahrzeugen beobachten: Im Jahr 2013 erfüllten schon 30 % der Sattelzüge die Euro-VI-Norm, bei den Lkw waren es erst 11 %. Ab 2016 erfüllten 100 % der Fahrzeuge Euro-VI.

Tabelle 68: Anteile Eurostufen an den Neuzulassungen bei den schweren Nutzfahrzeugen

	LKW Euro V	LKW Euro VI	SZ Euro V	SZ Euro VI
2013	89%	11%	70%	30%
2014	34%	66%	11%	89%
2015	12%	88%	1%	99%
2016-2050		100%		100%

Anmerkungen: Bis 2018 KBA, danach Annahmen

3.6.1.4 Einführungszeiträume bei Bussen

Laut KBA-Statistik erfüllen Linienbusse in der Regel früher neue Grenzwerte als Reisebusse. Im Jahr 2014 erfüllten schon 85 % der neu zugelassenen Linienbusse die Euro-VI-Norm, bei den Reisebussen waren es erst 69 %. Ab 2016 beträgt Euro-VI-Anteil 100 %.

Tabelle 69: Anteile Eurostufen an den Neuzulassungen bei Bussen

	Reisebusse Euro-V	Reisebusse Euro-VI	Linienbusse Euro-V	Linienbusse Euro-VI
2011	100%		100%	
2012	98%	2%	98%	2%
2013	93%	7%	89%	11%
2014	31%	69%	15%	85%
2015	4%	96%	1%	99%
2016-2050		100%		100%

Anmerkungen: Bis 2018 KBA, danach Annahmen

3.6.1.5 Einführungszeiträume motorisierten Zweirädern

Für Motorräder gelten seit 1.1.2006 die Grenzwerte der Stufe Euro-3. Seit Januar 2016 gilt die EU-Verordnung 168/2013. Sie enthält sehr ambitionierte Emissionsstandards unter anderem für Motorräder und Mopeds bis zu Emissionsstufe Euro 5. Hier sind bis zum Jahr 2021 Grenzwerte für Verdunstungsemissionen (HC), Onboard-Diagnose (OBD), Lärm und Dauerhaltbarkeitsanforderungen in Bezug auf die Emission mindernden Bauteile vorgeschrieben (UBA, 2015).

Kleinkrafträder unterliegen seit 2002 der Stufe Euro-2. Die Grenzwerte der Stufen Euro-4 und Euro-5 gelten für Kleinkrafträder gleichermaßen.

In TREMOD werden die Einführungszeiträume wie im HBEFA 4. 1 angenommen:

Kleinkraftrad Euro 4: ab 2018

Alle Euro-5: ab 2021

3.6.2 Schienenverkehr

Die für den Schienenverkehr eingeführten Grenzwerte der Stufe IIIa sind seit Anfang 2009 vollständig in Kraft getreten. Die nächste Stufe IIIb folgte im Jahr 2012. Im Jahr 2021 erfolgt eine weitere Grenzwertstufe, die eine Verschärfung bei den Partikelemissionen der Triebwagen vorsieht. Im Trendszenario wird angenommen, dass diese Grenzwerte im Realbetrieb umgesetzt werden. Dabei werden folgende Zeithorizonte angenommen:

- ▶ Personenverkehr: Bis 2040 verkehren nur noch Triebwagen der Stufe V und keine lokbespannten Züge mehr. Es werden dadurch bis 2040 Emissionswerte von 10 g/kg Kraftstoff bei NO_x und 0,08 g/kg bei Partikel erreicht.
- ▶ Güterverkehr: Die Grenzwerte der Stufe V werden bis 2040 vollständig in der Flotte umgesetzt. Daraus ergeben sich bis 2040 Emissionswerte von 20 g/kg bei NO_x und 0,12 g/kg bei Partikel.
- ▶ Rangierlokomotiven erreichen aufgrund der früheren Verschärfung bereits mit Stufe IIIa ab 2007 die Zielwerte für die mittlere Flotte bereits 2030. Sie entsprechen in ihrer Höhe dann denjenigen im Güterverkehr.

Tabelle 70: Emissionsgrenzwerte Schienenverkehr (g/kWh)

Stufe	Gültig ab*	Leist-kl. (kW)	CO	HC	NO _x	PM
Triebwagen						
IIIa	1/06	Alle	3,5		4,0 (HC+NO _x)	0,2
III b	1/12	Alle	3,5	0,19	2,0	0,025
V	2021	Alle	3,5	0,19	2,0	0,015
Lokomotiven						
IIIa	1/07	≤560	3,5		4,0 (HC+NO _x)	0,2

Stufe	Gültig ab*	Leist.-kl. (kW)	CO	HC	NO _x	PM
IIIa	1/09	>560	3,5	0,5	6,0	0,2
IIIa	1/09	>2000	3,5	0,4	7,4	0,2
IIIb	1/12	Alle	3,5		4,0 (HC+NO _x)	0,025
V	2021	Alle	3,5		4,0 (HC+NO _x)	0,025

Bemerkungen: *Gültig für neue Fahrzeuge; neue Typen 6-12 Monate später; Quelle: EU 2002a

3.6.3 Binnenschifffahrt

Die Berechnungsmethodik der Binnenschifffahrt im Modul TREMOD-NA berücksichtigt die spezifischen Emissionen der Binnenschiffsmotoren nach Baujahren. In der zukünftigen Entwicklung wird über Überlebensfunktionen eine Umschichtung des Motorenbestands in der Binnenschifffahrt modelliert. Die seit 2007 geltenden Emissionsgrenzwerte für die Binnenschifffahrt sind über die ZKR-Stufe II sowie die seit 2009 geltende Stufe IIIA der Richtlinie 97/68/EG definiert. Zusätzlich wurde ab dem Jahr 2019 die Abgasstufe V eingeführt, welche weitere Reduktionen für die PM und NO_x-Emissionen fordert. Ab dem Jahr 2020 kommen auch Schiffe mit LNG-Antrieb in die Flotte. Aufgrund der bei LNG-Motoren gegenüber Dieselmotoren höheren spezifischen HC-Emissionen steigen diese im Gegensatz zu den anderen Schadstoffen ab 2020 an (Tabelle 71).

Tabelle 71: Mittlere Emissionsfaktoren der Binnenschifffahrt (in g/kg) im Trendszenario

Komponente	2020	2030	2040	2050
CO	9,6	7,7	6,3	5,7
HC	2,5	3,2	4,2	4,1
NO _x	47,4	29,4	18,2	15,8
PM	1,1	0,6	0,3	0,2

Quelle: (ifeu, 2016; ifeu / INFRAS, 2013); eigene Berechnungen

3.6.4 Flugverkehr

Für den Flugverkehr wird angenommen, dass die spezifischen Emissionen pro kg verbrauchtem Kraftstoff zukünftig konstant bleiben. Zwar wird von der internationalen Luftverkehrsvereinigung IATA ein Zielwert der NO_x-Emissionen bis 2050 von -90 % (ggü. 2000) bei einer Kraftstoffverbrauchsreduktion von -75 % angegeben, was einer überproportionalen Reduktion der NO_x-Emissionen entspricht (IATA 2013). Szenarien-Rechnungen mit einem Flottenmodell von (Schäfer 2013) gehen hingegen zukünftig von einer unterproportionalen Reduktion der NO_x-Emissionen aus.

Vereinfacht wird daher für das Trendszenario angenommen, dass die spezifischen Emissionen für alle Schadstoffe analog zum spezifischen Energieverbrauch jährlich um 1 % (im CCD bezogen auf die Transportleistung bzw. im LTO pro Start) sinken.

3.7 Entwicklung der Vorketten und der Anteile der Energieträger

Im Trendszenario wird davon ausgegangen, dass Diesel- und Otto-Kraftstoff sowie Kerosin die dominierenden Antriebsenergien bleiben. CNG und LPG bleiben Alternativen mit geringem Anteil. Strom wird allmählich eine relevante Antriebsenergie nicht nur im Schienenverkehr, sondern auch im Straßenverkehr insbesondere bei den leichten Fahrzeugen (PKW, LNF, MZR) und Linienbussen. Biokraftstoffe werden weiterhin als Beimischung zu den konventionellen Kraftstoffen eingesetzt. Berücksichtigt werden die Biokraftstoffe, die vom Biokraftstoffquotengesetz vorgeschrieben werden. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um die Beimischung von Biodiesel bzw. Ethanol. Strombasierte synthetische Kraftstoffe („Power-to-x“) werden im Trendszenario erst im Jahr 2050 und in geringen Mengen betrachtet.

3.7.1 Fossile flüssige und gasförmige Kraftstoffe

Die Annahmen zur Entwicklung der Bereitstellung fossiler Kraftstoffe wurde aus dem Referenzszenario der UBA-Studie Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050 (Bergk et al. 2016) übernommen. Tabelle 72 zeigt beispielhaft die sich daraus ergebende Entwicklung der Treibhausgasemissionsfaktoren bis 2050.

Tabelle 72: THG-Emissionen der Vorkette fossiler Kraftstoffe im Trendszenario (g CO₂eq/MJ)

Kraftstoff	2010	2020	2030	2040	2050
Benzin	13,7	14,0	14,0	14,0	12,2
Diesel	15,3	15,6	15,6	15,6	13,8
Kerosin	15,3	15,6	15,6	15,6	13,7
CNG	14,4	12,8	13,0	13,4	14,1
LPG	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9

Quelle: eigene Darstellung nach LBST, siehe (Bergk et al. 2016)

Die zeitliche Entwicklung ergibt sich durch Annahmen seitens einer Verschiebung der Kraftstoffbereitstellung. Die wichtigsten Änderungen sind hier zusammengefasst:

- ▶ Benzin, Diesel und Kerosin: Der Anteil unkonventioneller Erdölvorhaben, z.B. Teersande, Ölschiefer steigt von 2010 bis 2020 leicht an und bleibt bis 2040 in etwa gleich. Nach 2040 werden strombasierte Kraftstoffe (PTL) eingesetzt. Deren Anteil steigt bis 2050 auf 2 %.
- ▶ CNG: Die Transportreichweite für das per Pipeline importierte Erdgas nimmt bis 2050 zu.
- ▶ LPG: Das Flüssiggas wird während des gesamten Zeitraums vorwiegend als Nebenprodukt der Rohölverarbeitung gewonnen.

3.7.2 Biokraftstoffe

Für die zukünftige Entwicklung des Anteils der Biokraftstoffe und deren Emissionsfaktoren werden folgende gesetzliche Vorgaben betrachtet:

- ▶ Bis 2020: Die (BImSchG §37a(4)) erweitert durch die 38. BImSchV stellen die nationale Umsetzung der europäischen Erneuerbaren Energien Richtlinie (EU-Richtlinie 2009/28/EG)

und der Kraftstoffqualitätsrichtlinie (EU-Richtlinie 2009/30/EG) dar. Infolgedessen muss die Nettoeinsparung der THG-Emissionen durch erneuerbare Kraftstoffe ab 2015 im Verkehr mindestens 3,5 % und ab 2020 mindestens 6 % erreichen. Die Biokraftstoffe müssen dabei ab 2020 mindestens um 60% geringere THG-Emissionen haben als fossile Kraftstoffe.

- Bis 2030: Für den Zeitraum nach 2020 bis 2030 haben Rat und Parlament der EU im Dezember 2018 die Verordnung (EU) 2018/2001 als Neufassung der Erneuerbare Energien-Richtlinie (RED II) veröffentlicht (siehe (EU 2018)). Das (komplexe) Regelwerk umfasst verschiedene Quoten und Anrechnungsmöglichkeiten in Abhängigkeit der erneuerbaren Energieträger, darunter konventionelle Biokraftstoffe, erneuerbarer Strom und sog. „advanced biofuels“. Auf die konkreten Vorgaben und die Möglichkeit deren Erfüllung wird im Folgenden näher eingegangen.

3.7.2.1 Anteile der Biokraftstoffe am Endenergieverbrauch

Für das Trendszenario wird bis 2020 eine Steigerung des prozentualen Biokraftstoffanteils am Endenergieverbrauch auf 6,5% Biodiesel im Diesel und 6,1% Ethanol in Benzin analog zum Projektionsbericht 2017 (Bundesregierung 2017) angenommen.

Der Anteil von Biogas in CNG bleibt konstant ab 2017. Nach 2020 bleiben die prozentualen Anteile von Biodiesel und Ethanol ebenfalls konstant. Der Einsatz von Biokraftstoffen in der Luftfahrt (Bio-kerosin) wurde aktuell noch nicht betrachtet, könnte aber im Zeitraum bis 2050 an Bedeutung gewinnen und in späteren Szenarien berücksichtigt werden.

Tabelle 73: Anteile Biokraftstoffe und Strom im Trendszenario

Energieträger	2017	2018	2020	2030	2050
Biodiesel an Diesel	5,0%	5,5%	6,5%	6,5%	6,5%
Bioethanol an Benzin	4,1%	4,3%	6,1%	6,1%	6,1%
Biogas an CNG	19,2%	19,0%	19,2%	19,2%	19,2%

Quellen: AG Energiebilanzen (Werte 2017 und 2018), Projektionsbericht 2017 (Anteil Biodiesel und Ethanol 2020-2030) und eigene Annahmen

Sowohl die THG-Quote in 2020 als auch die Vorgaben der RED II bis 2030 lassen gewisse Spielräume für die Annahmen der Biokraftstoffanteile zu, weshalb die getroffenen Annahmen nur einen möglichen Zielpfad darstellen können. So wurden im bisherigen TREMOD-Trendszenario höhere Biokraftstoffanteile angenommen (9% Biodiesel, 7% Ethanol). Die Überlegungen hierzu werden im Folgenden erläutert.

Erfüllung der THG-Quote von -6% bis 2020

Die geringeren Anteile ergeben sich zum einen dadurch, dass neben Biokraftstoffen auch Minderungen der spezifischen THG-Emissionen durch Reduktion der Upstream-Emissionen, Strom und andere alternative Kraftstoffe, z.B. LPG und CNG, angerechnet werden können. Somit wäre durch die Biokraftstoffe nur eine THG-Minderung von ca. 5% erforderlich (Bundesregierung 2017). Dies wurde bisher für TREMOD nicht berücksichtigt.

Weiterhin liegt die im Projektionsbericht 2017 durch Biokraftstoffe durchschnittlich erzielte THG-Minderung mit 78,7% deutlich höher als die für TREMOD zugrunde gelegten Emissionsfaktoren aus BioEM (Fehrenbach et al. 2016). Im TREMOD-Ergebnis liegt die

Minderung somit nur bei 5,4%, da die spezifische THG-Minderung mit im Mittel 65,9% geringer als im Projektionsbericht ist, der Anteil an Biokraftstoffen aber gleich (Tabelle 74).

Für die Quotenerfüllung sind jedoch die Minderungen nach den Angaben der Inverkehrbringer von Biokraftstoffen über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) relevant, welche auch dem Projektionsbericht 2017 zugrunde liegen. Möglicherweise wurden hierbei Emissionsminderungen angerechnet, welche mit den Grundlagen von BioEM nicht nachvollziehbar sind. Die Unterschiede sollten daher im Rahmen weiterer Forschungsvorhaben untersucht werden.

Tabelle 74: Beispielrechnungen Erfüllung der THG-Quote 2020 im Trendszenario

Wert	Projektionsbericht 2017	TREMOD
Anteil Biogas an CNG (MJ/MJ)	n.a.	19,2%
Anteil Biodiesel an Diesel (MJ/MJ)	6,5%	6,5%
Anteil Bioethanol an Benzin (MJ/MJ)	6,1%	6,1%
Biokraftstoffanteil gesamt (MJ/MJ)	6,3%	6,2%
Mittlere THG-Minderung Biokraftstoffe gegenüber fossilem Basiswert (94,1 gCO ₂ eq/MJ)	78,7%	65,9%
THG-Reduktion durch Biokraftstoffe	5,0%	4,1%
THG-Reduktion durch Upstream, Strom, LPG, CNG	1,0%	1,1%
THG-Reduktion insgesamt	6,0%	5,4%

Quellen: Projektionsbericht 2017, TREMOD: Endenergieverbrauch 2020 nach eigener Berechnung, THG-Minderung gemäß BioEM, eigene Berechnungen gemäß Vorgaben BImSchG §37a(4)) und 38. BImSchV Erfüllung der RED II-Quoten bis 2030

Die wesentlichen Vorgaben der RED II umfassen folgende Quoten (siehe (EU 2018), Artikel 25-28):

- ▶ Der Anteil von Biokraftstoffen auf Basis von Anbaubiomasse am Endenergieverbrauch in einem Mitgliedstaat darf max. 1 % höher liegen als im Jahr 2020 und eine Obergrenze von 7 % nicht überschreiten.
- ▶ Biokraftstoffe aus Altpflanzenöl oder Tierfetten dürfen maximal zu 1,7 % eingesetzt werden.
- ▶ Biokraftstoffe mit hohem Risiko für indirekte Landnutzungsänderungen, z.B. Palmöl, müssen ab 2023 graduell reduziert werden und im Jahr 2030 ausgeschlossen werden.
- ▶ Für fortschrittliche Biokraftstoffe, z.B. Biokraftstoffe aus Reststoffen, aber auch erneuerbaren Strom bzw. Strombasierte Kraftstoffe (siehe Liste zu „advanced biofuels“ gemäß Teil A, Anhang IX) muss im Jahr 2030 eine Mindestquote von 3,5 % erfüllt werden (2022: 0,2%, 2025: 1%).

- Insgesamt sind im Verkehr 14 % Erneuerbare Energie am Endenergieverbrauch zu erreichen. Diese Gesamtquote kann jedoch um die Differenz der Biokraftstoffe aus Anbaumasse eines Landes im Jahr 2019 bis zur Obergrenze von 7% gesenkt werden. Anrechenbar sind hierbei i) im Nenner: alle eingesetzten Kraftstoffe im Straßen- und Schienenverkehr und ii) im Zähler: alle eingesetzten Kraftstoffe im Verkehr aus erneuerbaren Quellen (Die Anrechnung von Strombasierten Kraftstoffen liegt in der Entscheidung der Mitgliedstaaten), wobei folgende Mehrfachanrechnungen möglich sind: erneuerbare Elektrizität im Straßenverkehr 4-fach, erneuerbare Elektrizität im Schienenverkehr 1,5-fach, „advanced biofuels“ 2-fach, Biokraftstoffe im Luft- und Seeverkehr, sofern nicht aus Anbaubiomasse, 1,2-fach.

Tabelle 75 zeigt den Anteil erneuerbarer Kraftstoffe im Trendszenario gemäß der Einteilung nach RED II. Hierbei sind die Annahmen zu Biokraftstoffanteilen, des jeweiligen Biomassemix für Biodiesel, Ethanol und Biogas (siehe Kapitel 3.7.2.2), und dem Stromverbrauch aus erneuerbaren Energien im Verkehr nach Bundesmix (Kapitel 3.7.3.3) berücksichtigt.

Es werden alle Anforderungen der RED II erfüllt. Insbesondere die Elektromobilität leistet hierbei einen wesentlichen Beitrag: EE-Strom trägt somit 2,4% zur Mindestquote von 3,5% „advanced biofuels“ bei bzw. 7,2% zur erforderlichen Gesamtquote von 10,5% . In Summe wird die Gesamtquote mit 16% aufgrund der Biokraftstoffe sogar übererfüllt, da angenommen wurde, dass die Biokraftstoffanteile nach 2020 konstant bleiben. Im Gegensatz zum EE-Strom nimmt ihr absoluter Endenergieverbrauch von 2020 bis 2030 jedoch ab da auch der Endenergieverbrauch von Benzin und Diesel abnimmt.

Tabelle 75: Anteil erneuerbarer Energien im Verkehr im Jahr 2030 und Anrechnung nach RED II

	Real	Rechnerisch
Fortschrittliche Biokraftstoffe (ANNEX IV Teil A)	1,1 %	2,2 %
EE-Strom Straße	1,4 %	5,6 %
EE-Strom Schiene	1,0 %	1,6 %
Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse	3,5 %	3,5 %
Biokraftstoffe aus Altöl/Tierfetten (ANNEX IV Teil B)	1,5%	3,1 %
Summe	8,5 %	16,0%

Quelle: Eigene Darstellung. Grundlage für die Berechnung sind die Annahmen zu Biokraftstoffanteilen, des jeweiligen Biomassemix für Biodiesel, Ethanol und Biogas, und dem Stromverbrauch aus erneuerbaren Energien im Verkehr nach Bundesmix (siehe die jeweiligen Abschnitte im Text).

Es ist zu beachten, dass die nationale Umsetzung der RED II abweichende Vorgaben ermöglichen kann. So ist es zum Beispiel möglich, dass Deutschland, wie im Koalitionsvertrag (Deutscher Bundestag 2018) beschrieben, eine Fortführung der THG-Quote bis 2030 einführt. Deren mögliche Ausgestaltung und Minderungsziel sind aber noch unklar. Daher sollten die Annahmen für TREMOD parallel zur politischen Entscheidungsfindung zukünftig geprüft und bei Bedarf angepasst werden.

3.7.2.2 Biomassemix und Emissionsfaktoren

Im Trendszenario wird eine Veränderung des durchschnittlichen Biomassemixes und der Produktionsverfahren unterstellt. Relevant dafür sind die politischen Vorgaben, wie im vorigen Kapitel beschrieben, welche einerseits eine zusätzliche schrittweise Reduktion der mittleren THG-Emissionen bei Biokraftstoffen erfordern und andererseits einen Ausstieg kritischer Rohstoffe, insbesondere Palmöl, bis 2030 vorsehen. Den Biomassemix bis zum Jahr 2030 zeigt folgende Tabelle. Zwischen den angegebenen Stützjahren werden die Anteile linear interpoliert, nach 2030 werden die Anteile konstant gelassen.

Tabelle 76: Biomassemix (Anteile) der Biokraftstoffe im Trendszenario

Kraftstoff	Kategorie	Biomassetyp	2017	2020	2030
Ethanol	Anbaubiomasse	Mais, Roggen, Weizen, Zuckerrohr, Zuckerrübe	100%	70%	50%
Biodiesel	ANNEX IV Teil A	Ligno-Zellulose (advanced)	0%	30%	50%
	Anbaubiomasse	FAME (Raps- oder Sojaöl)	37%	20%	65%
		FAME/HVO Palmöl	25%	45%	0%
	ANNEX IV Teil B	Altöl/Tierfette	38%	35%	35%
Biogas	ANNEX IV Teil A	Reststoffe (advanced)	100%	100%	100%

Quelle: (BLE 2017) und Annahmen ifeu

Tabelle 77 zeigt die mittleren THG-Emissionen der Biokraftstoffe im Trendszenario inklusive der zeitlichen Änderung aufgrund des veränderten Biomassemix. So nehmen die THG-Emissionen bei Ethanol wegen Prozessverbesserungen (Biogas HKW statt fossil befeuerte Kessel) ab, bei Biodiesel hingegen nach 2020 wegen dem Umstieg auf Raps- und Sojaöl leicht zu.

Tabelle 77: THG-Emissionsfaktoren (g CO₂eq/MJ) der Biokraftstoffe im Trendszenario

Kraftstoff	2017	2020	2030
Ethanol	59,2	37,9	31,6
Biodiesel	32	29,6	37,1
Biogas	14	14	14

Quelle: BioEM und eigene Annahmen. Anmerkung: THG-Emissionen well-to-wheel (inklusive Vorkette)

3.7.3 Strom

3.7.3.1 Emissionsmodellierung in TREMOD und HBEFA

Im Zuge der Aufnahme von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben in das neue Handbuch für Emissionsfaktoren wurde vom ifeu ein Vorgehen zur Abschätzung zukünftiger Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung abgeleitet. Dieses vereinfachte Modell dient zur Ermittlung von Emissionsfaktoren in Szenarien. Das Modell kann prinzipiell auch für TREMOD mit geeigneten Anpassungen (Herstellung der Kompatibilität mit UBA-Methodik) und Erweiterungen (Berücksichtigung der übrigen Emissionskomponenten, Anpassungen für Eisenbahn und Straßenbahn) verwendet werden.

Realdaten werden dabei (wie bisher in TREMOD bereits erfolgt) weiterhin anhand der vom Umweltbundesamt jährlich bereitgestellten Emissionsfaktoren übernommen.

Für die Szenariodaten müssen verschiedene Informationen vorliegen:

- ▶ Emissionsfaktoren für die Bruttostromerzeugung (differenziert nach Kraftwerkstyp und Energieträger)
- ▶ Energiemix der Bruttostromerzeugung je Bezugsjahr (differenziert nach Kraftwerkstyp und Energieträger sowie u.U. Angaben zu den Stromimporten aus dem Ausland)
- ▶ Umwandlungs- und Transportverluste vom Kraftwerk zum Verbraucher

Mit diesen Angaben können für die Bezugsjahre Emissionsfaktoren ermittelt werden, wobei Zwischenjahre durch eine (lineare) Interpolation berechnet werden können.

3.7.3.2 Emissionsfaktoren der Stromerzeugung

- ▶ Für die Ableitung von Emissionsfaktoren der Stromerzeugung werden folgende Prozesse berücksichtigt:
- ▶ Gewinnung der primären Energieträger (z.B. Kohle, Gas oder Biomasse) und Transport zum Kraftwerk
- ▶ Umwandlung der Energieträger im Kraftwerk
- ▶ Energieverteilung im Stromnetz (inklusive Umwandlungs- und Transportverluste)

Abzustimmen ist noch, inwiefern auch Bau und Entsorgung der Kraftwerke in den Stromvorketten berücksichtigt werden, da diese, gerade bei hohen Anteilen erneuerbarer Energie, nicht zu vernachlässigende Umweltwirkungen haben.

Für das Handbuch für Emissionsfaktoren wurden vereinfachte Treibhausgasemissionen anhand der Schweizer Ökobilanzdatenbank ecoinvent 3.4 (cut-off Systemmodell) (Weidema et al. 2013) abgeleitet. Diese enthaltenen die komplette Prozesskette bis zum Kraftwerksausgang. Für die Umspannungs- und Leitungsverluste wurden weitergehende Angaben genutzt.

Dabei wird der Strom entweder auf Niederspannungsebene (z.B. für Hausanschlüsse) oder Mittelspannungsebene (z.B. für Schnellladestationen) abgenommen und Verluste für beide Spannungsebenen mussten abgeleitet und bereitgestellt werden. Zudem werden Angaben zu den Verlusten auf Hochspannungsebene für die Versorgung der Züge benötigt. In Deutschland liegen die mittleren Stromverluste bei 4,1% nach (Eurostat 2015). Damit fallen auf Hochspannungsebene etwa 1,5%, auf Mittelspannungsebene etwa 2,6% und auf Niederspannungsebene 5,4% Verluste an. Die Berechnung der resultierenden Emissionsfaktoren beim Endabnehmer kann dabei so erfolgen:

$$[EFA]_{\text{Abnehmer}} = [EFA]_{\text{Kraftwerk}} / (1 - \text{Verluste})$$

EFAAbnehmer: WTT Emissionsfaktor beim Endverbraucheremission

EFAKraftwerk: WTT Emissionsfaktor am Kraftwerksausgang

Verluste: Verluste zwischen Kraftwerk und Endverbraucher

Weitergehende Stromverluste treten an der Oberleitung auf oder an den Ladestationen für Elektrofahrzeuge, diese werden jedoch getrennt von der Stromerzeugung betrachtet.

Aktuell enthält der ecoinvent Datensatz für Deutschland mehr als 20 verschiedene Stromerzeugungsarten, die teilweise aggregiert werden mussten. Da das HBEFA nicht nur für Deutschland gilt, sondern für die ganze EU (insbesondere auch für Österreich, die Schweiz, Frankreich und Schweden) wurde nicht nur der deutsche Kraftwerkbestand ausgewertet. Dabei gibt es durchaus regionale Unterschiede in der Stromerzeugung durch unterschiedlich alte Kraftwerke (und damit unterschiedliche Wirkungsgrade) sowie verschiedene Brennstoffe (Herkunft und Eigenschaften). Schweden hat die meiste Wasserkraft, daher wurde der Treibhausgaswert für Wasserkraft hieraus abgeleitet. Frankreich ist mit seinem sehr hohen Anteil an Kernkraftwerken ausgewählt worden, um den Emissionsfaktor von Kernkraftwerken zu ermitteln. Deutschland hat von den betrachteten Ländern den am breitesten aufgestellten Strommix, so dass sowohl die Werte für die konventionelle Stromerzeugung aus Braun- und Steinkohle sowie Gas/ Erdöl als auch die Werte für Windkraft, Photovoltaik und Biomasse hierher stammen.

Dabei gibt es für TREMOD die Möglichkeit entweder dieselben (default) Werte wie im HBEFA zu nehmen oder eigene Werte zu ermitteln.

Die bevorzugte Vorgehensweise wäre eine direkte Übernahme der Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes um eine größtmögliche Übereinstimmung zwischen den Realdaten für heute und den Szenarioergebnissen zu erreichen und Brüche zu vermeiden.

Anzumerken ist, dass bei der Verwendung statischer Emissionsfaktoren mögliche zukünftige Verbesserungen in den Stromerzeugungstechnologien nicht abgebildet sind. Aufgrund der schwer abzuschätzenden zukünftigen Verbesserungen und der Kontinuität der Zeitreihe wird jedoch vorgeschlagen mit den heutigen Werten auch die Szenariodaten zu ermitteln.

Mögliche aus ecoinvent 3.4 abgeleitete Treibhausgasemissionen nach (IPCC 2007) zeigt Tabelle 78).

Tabelle 78: Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung

	Emissionsfaktor in g CO ₂ eq/ kWh
Kohle	1152
Erdgas	536
Wasserkraft	13
Wind	18
Kernkraft	11
Photovoltaik	98
Biomasse	212
Öl	831

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von ecoinvent 3.4

Bisher wurden im Handbuch für Emissionsfaktoren die Emissionen weiterer Luftschadstoffe nicht betrachtet. Falls vom Umweltbundesamt keine Stromvorkettenfaktoren bereitgestellt werden können, wäre eine Prüfung der ecoinvent Werte notwendig.

Da Deutschland aktuell (und vermutlich auch in Zukunft) ein Nettostromexporteur ist, reicht es einen Herstellungsmix zu berechnen, d.h. die Bilanzierung von Stromimporten kann wegfallen.

3.7.3.3 Entwicklung des Strommixes

Für die Ableitung zukünftiger Strommixe wird auf Daten aus aktuellen Szenarien zur Stromerzeugung in Deutschland und Europa zurückgegriffen.

Dabei wird für das Handbuch für Emissionsfaktoren der europäische Mix aus dem europäischen Referenzszenario (Capros et al. 2016) verwendet. Das European Reference Scenario berechnet eine Trendprojektion der Stromerzeugungsmixe in Fünfjahresschritten unter der Annahme, dass alle zur Studiererstellung vorhandenen verbindlichen Klima- und Umweltziele in den Ländern eingehalten werden. In dieser Publikation sind auch Angaben zum zukünftigen deutschen Strommix enthalten, die allerdings, auch aufgrund des Alters der Studie, noch nicht alle aktuellen Ziele zum Ausbau der erneuerbaren Energien einhalten. Vorteilhaft an einer Verwendung des European Reference Scenario ist, dass hiermit konsistente Strommixe für alle EU Länder und die EU als Ganzes erhalten werden.

Tabelle 79: European Reference Scenario Strommix EU 28

	2010	2020	2030	2040	2050
Nuklear	28%	23%	22%	20%	18%
Kohle	25%	23%	16%	9%	6%
Öl	3%	1%	1%	0%	0%
Gas	24%	17%	19%	25%	21%
Biomasse	4%	6%	8%	10%	10%
Wasser	11%	11%	11%	11%	10%
Wind	5%	14%	17%	18%	24%
Solar	1%	5%	7%	8%	11%
Summe Erneuerbare	21%	36%	43%	47%	55%

Quelle: European Reference Scenario (European Commission, 2016)

Tabelle 80: European Reference Scenario Strommix Deutschland

	2010	2020	2030	2040	2050
Nuklear	22%	6%			
Kohle	42%	46%	38%	26%	21%
Öl	1%	0%	1%	1%	0%
Gas	16%	13%	18%	25%	19%
Biomasse	7%	6%	9%	11%	12%
Wasser	3%	4%	4%	4%	5%
Wind	6%	18%	21%	23%	30%
Solar	2%	8%	10%	11%	13%
Summe Erneuerbare	18%	36%	44%	48%	60%

Quelle: European Reference Scenario (Capros et al. 2016)

Dennoch ist es empfehlenswert mit einem aktuelleren deutschen Szenario zu arbeiten. Vorgeschlagen wird die Verwendung des Basisszenarios aus den Langfristszenarien des BMWi. Im Projekt "Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau Erneuerbarer Energien in Deutschland" (BmWi 2017) wurden Szenarien für ein kostenoptimiertes und sicheres Energiesystem modelliert, dabei reicht der Zeithorizont bis ins Jahr 2050. Das Hauptszenario hier ist das Basisszenario, in dem die energie- und klimapolitischen Ziele möglichst kosteneffizient umgesetzt werden. Ebenfalls berücksichtigt sind die im EEG beschlossenen Ausbaupfade für Wind- und Solarenergie.

Tabelle 81: Langfristszenarien Basisszenario

	2010	2020	2030	2040	2050
Nuklear	16%	10%	0%	0%	0%
Kohle	44%	44%	30%	12%	5%
Öl	0%	2%	2%	1%	1%
Gas	11%	6%	14%	13%	7%
Biomasse	11%	8%	10%	8%	5%
Wasser	4%	3%	3%	3%	4%
Wind	9%	19%	33%	55%	67%
Solar	5%	7%	9%	8%	13%
Summe Erneuerbare	29%	37%	55%	75%	88%

Quelle: Langfristszenarien BMWi (BmWi, 2017), eigene Darstellung nach ifeu

Die Verwendung dieser Szenariodaten erlaubt eine stärkere Differenzierung der Energieerzeugungsarten als das EU Szenario, zudem werden hiermit wichtige politische Ziele im Bereich erneuerbarer Energien eingehalten.

3.7.3.4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die anhand der im vorigen Kapitel beschriebenen Szenariodaten und Emissionsfaktoren abgeleiteten Treibhausgasintensitäten der deutschen Strombereitstellung gezeigt und den Realwerten des Umweltbundesamtes gegenübergestellt.

Tabelle 82: Gegenüberstellung der berechneten Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung in g CO₂eq/ kWh in verschiedenen Szenarien und der UBA-Realwerte

	EU Ref Scen (DE)	Basisszenario DE	EU Ref Scen (EU 28)	UBA DE Real
2010	602		453	630
2013		606		645
2015	594		424	598
2020	619	577	386	

	EU Ref Scen (DE)	Basisszenario DE	EU Ref Scen (EU 28)	UBA DE Real
2030	570	457	319	
2040	476	241	271	
2050	391	124	221	

Quelle: (Icha / Kuhs, 2018) ergänzt um weitere Angaben des Umweltbundesamts, sowie eigene Berechnungen auf Basis von European Reference Scenario, Langfristszenarien und ecoinvent 3.5

Die Gegenüberstellung der Szenariodaten zeigt, dass die Verwendung des europäischen Referenzszenarios zu deutlich höheren Treibhausgasemissionen führt, da hier geringere Anteile erneuerbarer Energie erwartet werden. Dabei gibt es eine relativ gute Übereinstimmung zwischen den Realdaten der Jahre 2013 und 2015 gegenüber den eigenen Rechnungen auf Basis der Angaben zur Strommixzusammensetzung und der Treibhausgasfaktoren (6% bzw. 1% Abweichung).

Diese Unterschiede sind vermutlich auf Abweichungen zwischen den ecoinvent Daten und den vom UBA verwendeten GEMIS Daten zurückzuführen. Dabei sind die Daten des Umweltbundesamtes zum Strommix inklusive Infrastruktur bisher nicht veröffentlicht.

3.7.3.5 Vorgehen im TREMOD Trendszenario

Da das genaue Vorgehen für die Berechnung der Emissionsfaktoren der Stromerzeugung bis 2050 noch abzustimmen ist, wurde im Trendszenario bis 2050 eine vereinfachte Fortschreibung vorgenommen: Ausgehend von den Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes von 2018 wurden die relative Entwicklung der THG-Emissionen nach dem Basisszenario der Langfristszenarien ermittelt und die Emissionsfaktoren des UBA mit der relativen Entwicklung fortgeschrieben. Vereinfacht wurde diese relative Entwicklung nicht nur für die THG-Emissionen sondern für alle Emissionskomponenten angenommen.

4 Energieverbrauch und Emissionen des Verkehrs

In diesem Kapitel werden ausgewählte Ergebnisse des Energieverbrauchs und der Emissionen des Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2018 und im Trendszenario bis 2050 dargestellt. Schwerpunkt sind die Ergebnisse für den Inlandsverkehr, wie sie mit TREMOD berechnet wurden.

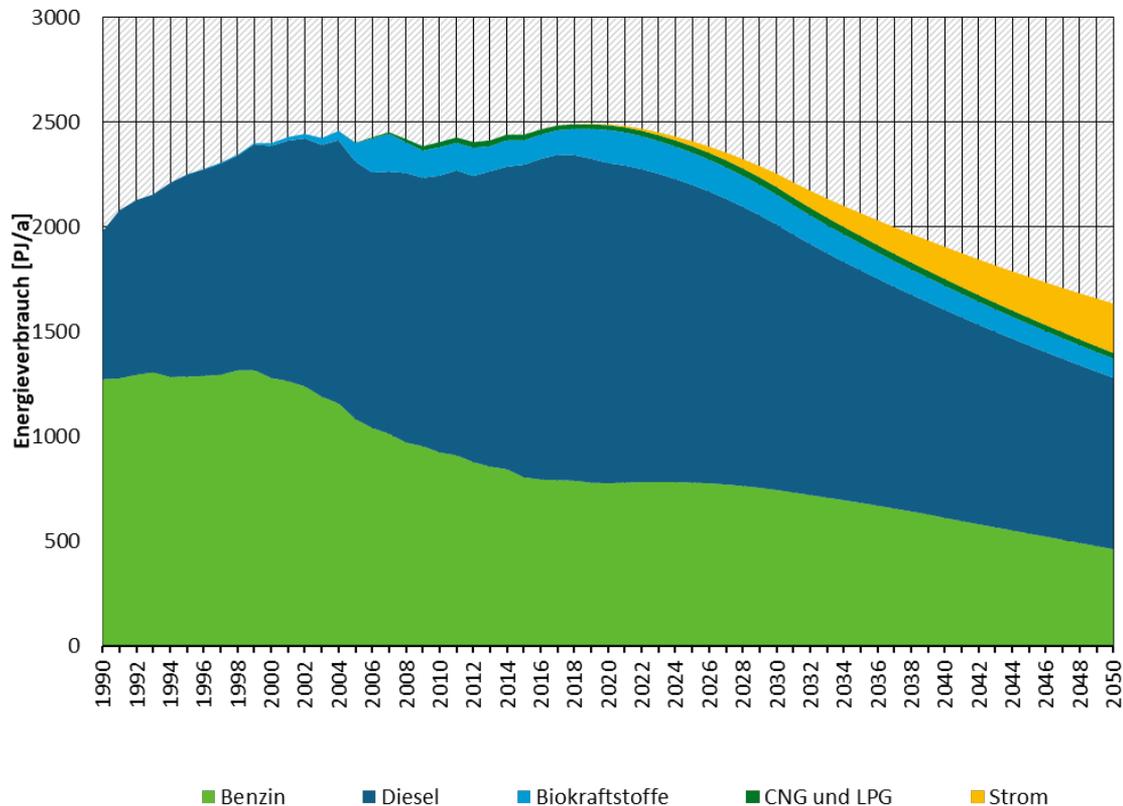
4.1 Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs nach Energieträgern

Abbildung 13 zeigt die Entwicklung des Energieverbrauchs des Straßenverkehrs in Deutschland auf inländischem Territorium unterschieden nach den Energieträgern Benzin (ohne Beimischung Bioethanol), Diesel (ohne Beimischung Biodiesel), Biokraftstoffe (Biodiesel, Bioethanol und Biogas), Erdgas (CNG und LNG) und Flüssiggas (LPG) sowie Strom (Kraftfahrzeuge ohne Pedelects). Danach zeigen sich bei den Energieträgern folgende Entwicklungen:

- ▶ Im Jahr 1990 dominierte der Verbrauch von Benzin, gefolgt von Diesel. In den Folgejahren nahm der Dieserverbrauch zu, während der Benzinverbrauch zunächst nahezu gleich blieb und ab dem Jahr 2000 zurückging. Unter den Randbedingungen des Trendszenarios geht der Benzinverbrauch bis zum Jahr 2050 weiter zurück. Der Dieserverbrauch nahm seit 1990 zu und lag im Jahr 2018 um 119 % höher als im Jahr 1990. Unter den Annahmen des Trendszenarios geht der Dieserverbrauch bis zum Jahr 2050 um 47 % gegenüber 2018 zurück.
- ▶ Seit 1995 kommen zunehmend Biokraftstoffe zum Einsatz, überwiegend als Beimischung zu den konventionellen Kraftstoffen. Bis 2018 erreichten sie einen Anteil von über 5 % am Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs. Unter den Annahmen des Trendszenarios nimmt der Anteil bis 2025 noch leicht zu und danach wegen der zunehmenden Elektrifizierung langsam ab.
- ▶ CNG und LPG haben über die gesamte Zeitreihe nur geringe Anteile am Energieverbrauch.
- ▶ Der Stromverbrauch im Straßenverkehr nahm in den letzten Jahren zu, und erreichte im Jahr 2018 einen Anteil von 0,04 % am Energieverbrauch. Unter den Annahmen des Trendszenarios steigt der Stromverbrauch bis zum Jahr 2050 auf 236 Petajoule an. Das entspricht einem Anteil von über 14 % am Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs.

Insgesamt nahm der Energieverbrauch des Straßenverkehrs von 1990 bis 2018 um 26 % zu. Unter den Randbedingungen des Trendszenarios nimmt er bis 2050 um 34 % gegenüber 2018 ab und liegt dann mit 1.634 Petajoule um 17 % niedriger als 1990.

Abbildung 13: Energieverbrauch des Straßenverkehrs in Deutschland nach Energieträgern - Entwicklung des Endenergieverbrauchs bis 2018 und im Trendszenario bis 2050



Anmerkungen: Endenergieverbrauch im Inland; bis 2018 real, ab 2019 Trendszenario
Quelle: TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

4.2 Endenergieverbrauch aller Verkehrsträger

Der Endenergieverbrauch des Verkehrs in Deutschland wird unter den Randbedingungen des Trendszenarios bis ca. 2022 weiter ansteigen und danach langsam abnehmen. Gründe dafür sind die weiter stark zunehmenden Verkehrsleistungen, insbesondere im Straßen- und Flugverkehr. Diese kompensieren die Minderungen des spezifischen Energieverbrauchs.

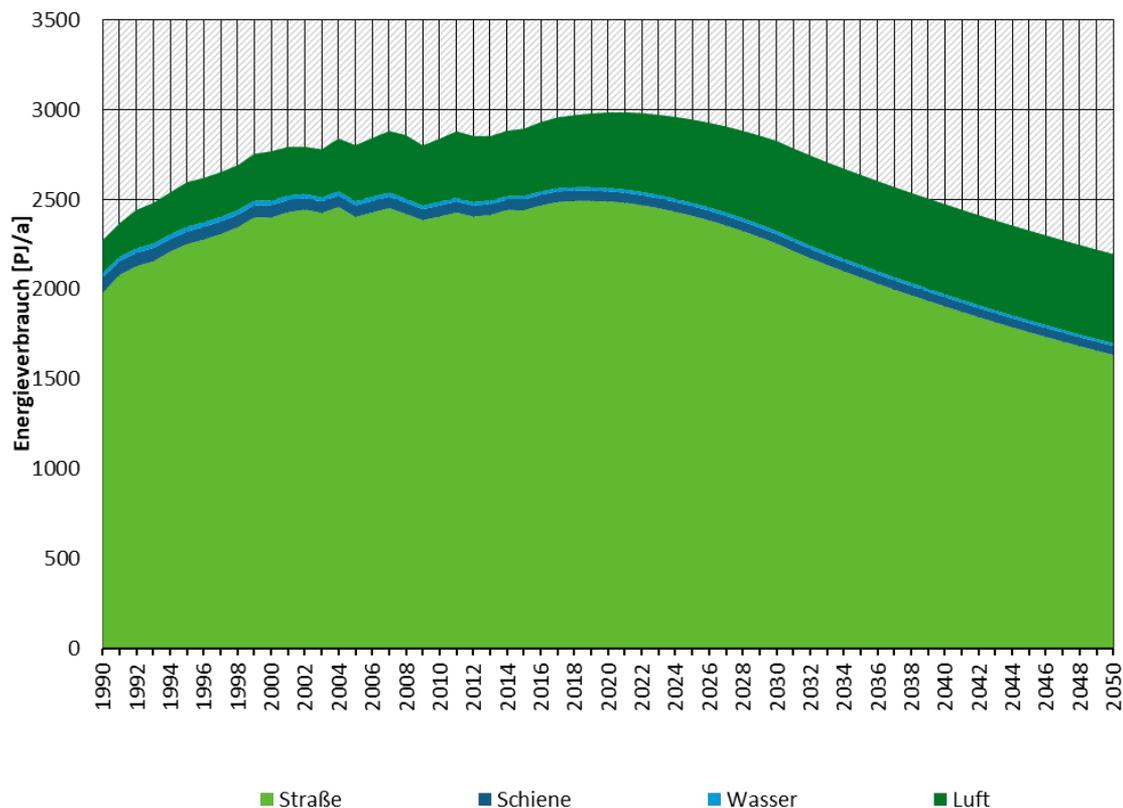
Abbildung 14 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2050 für die Verkehrsträger Straße (Straßenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen sowie Bussen auf inländischem Territorium), Schiene (Eisenbahn, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen auf inländischem Territorium), Wasser (Güterverkehr mit Binnenschiffen auf inländischem Territorium) und Luft (von Deutschland abgehender Flugverkehr bis zur ersten Zwischenlandung). Der Endenergieverbrauch pro Verkehrsträger entwickelt sich dabei wie folgt:

- Der Straßenverkehr hat über die gesamte Zeitreihe den größten Anteil am Energieverbrauch (87 % im Jahr 1990 bis 75 % im Jahr 2050), gefolgt vom Flugverkehr. Der Energieverbrauch des Straßenverkehrs nahm von 1990 bis 2018 um 26 % zu. Bis zum Jahr 2050 wird unter den Randbedingungen des Trendszenarios eine Abnahme von 34 % gegenüber 2018 berechnet.

- ▶ Der Energieverbrauch des Flugverkehrs nahm von 1990 bis 2018 um 118 % zu. Bis zum Jahr 2030 wird unter den Randbedingungen des Trendszenarios eine weitere Zunahme von 25 % gegenüber 2018 berechnet. Danach bleibt der Energieverbrauch nahezu konstant.
- ▶ Bei Bahn und Binnenschifffahrt ging der Energieverbrauch von 1990 bis 2018 um rund 30 % zurück. Bis zum Jahr 2050 wird unter den Randbedingungen des Trendszenarios eine weitere Abnahme von 17 % bzw. 23 % gegenüber 2018 berechnet.

Der Energieverbrauch nahm insgesamt für alle betrachteten Verkehrsträger von 1990 bis 2018 um 31 % zu. Bis zum Jahr 2050 wird unter den Randbedingungen des Trendszenarios eine Abnahme von 26 % gegenüber 2018 berechnet. Für alle Verkehrsträger zusammen liegt der Energieverbrauch im Jahr 2050 um 3 % unter dem Niveau von 1990.

Abbildung 14: Energieverbrauch des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung des Endenergieverbrauchs bis 2018 und im Trendszenario bis 2050



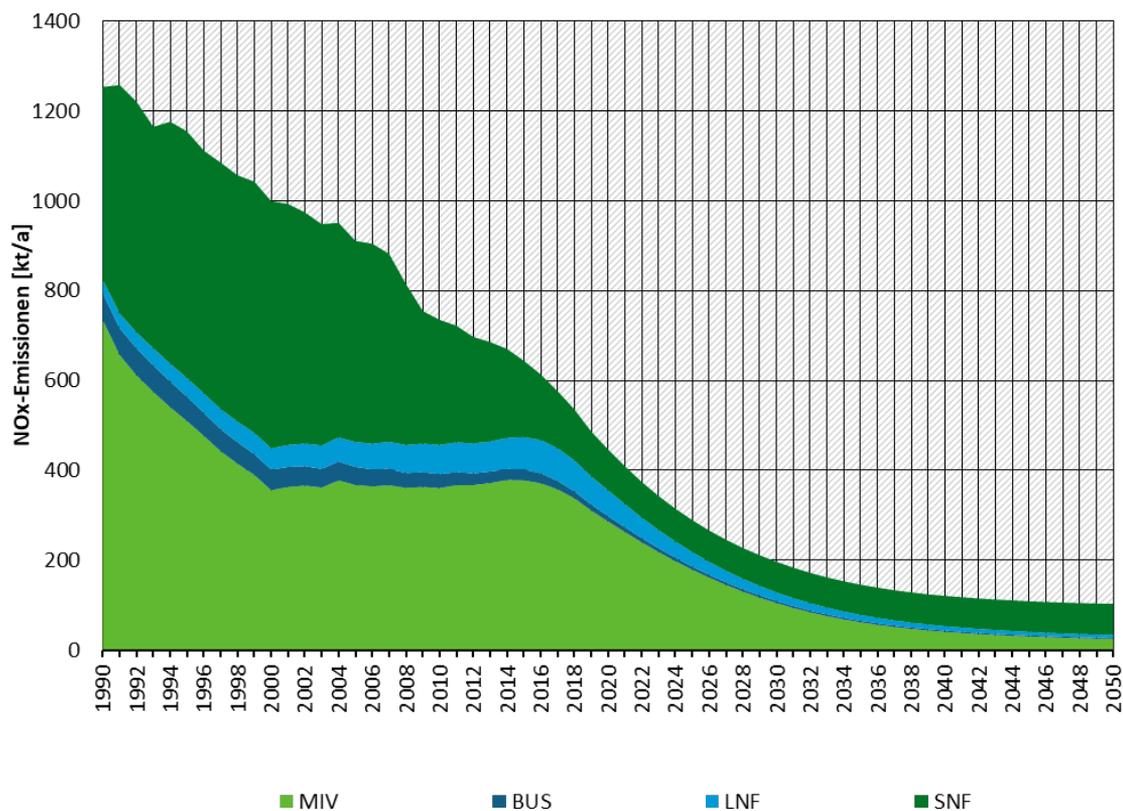
Anmerkungen: Endenergieverbrauch im Inland für Straße (Straßenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen sowie Bussen auf inländischem Territorium), Schiene (Eisenbahn, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen auf inländischem Territorium), Wasser (Güterverkehr mit Binnenschiffen auf inländischem Territorium) und Luft (von Deutschland abgehender Flugverkehr bis zur ersten Zwischenlandung); bis 2018 real, ab 2019 Trendszenario
Quelle: TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

4.3 Direkte Abgasemissionen des Straßenverkehrs

Abbildung 15 zeigt die Entwicklung der Stickstoffoxidemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland auf inländischem Territorium unterschieden nach den Fahrzeugarten MIV (Pkw und motorisierte Zweiräder), BUS (Linien- und Reisebusse), LNF (leichte Nutzfahrzeuge) und SNF (schwere Nutzfahrzeuge). Seit 1991 gingen die Emissionen zurück, bis zum Jahr 2000 vor

alles getrieben durch die Fortschritte in der Abgasgesetzgebung bei den Pkw. Seit 2000 führten hingegen deutliche Verbesserungen bei den schweren Nutzfahrzeugen zu einem Rückgang der Gesamtemissionen, während die anhaltend zu hohen Emissionen auch neuerer Diesel-Pkw (bis einschließlich Euro 6 a,b) zu einer Stagnation der Pkw-Emissionen bis 2016 führten. Insgesamt nahmen die Stickstoffoxidemissionen von 1.253 Kilotonnen im Jahr 1991 auf 536 Kilotonnen im Jahr 2018 und damit um 57 % ab. Unter den Randbedingungen des Trendszenarios wird bis zum Jahr 2050 ein weiterer Rückgang um 81 % auf 103 Kilotonnen berechnet. Dieser ist ebenfalls durch die Umschichtung des Fahrzeugbestands, zum einen mit aktuelleren Emissionsstandards und zum anderen mit einem zunehmenden Anteil von Elektrofahrzeugen, zu erklären.

Abbildung 15: Stickstoffoxidemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen bis 2018 und im Trend-Szenario bis 2050

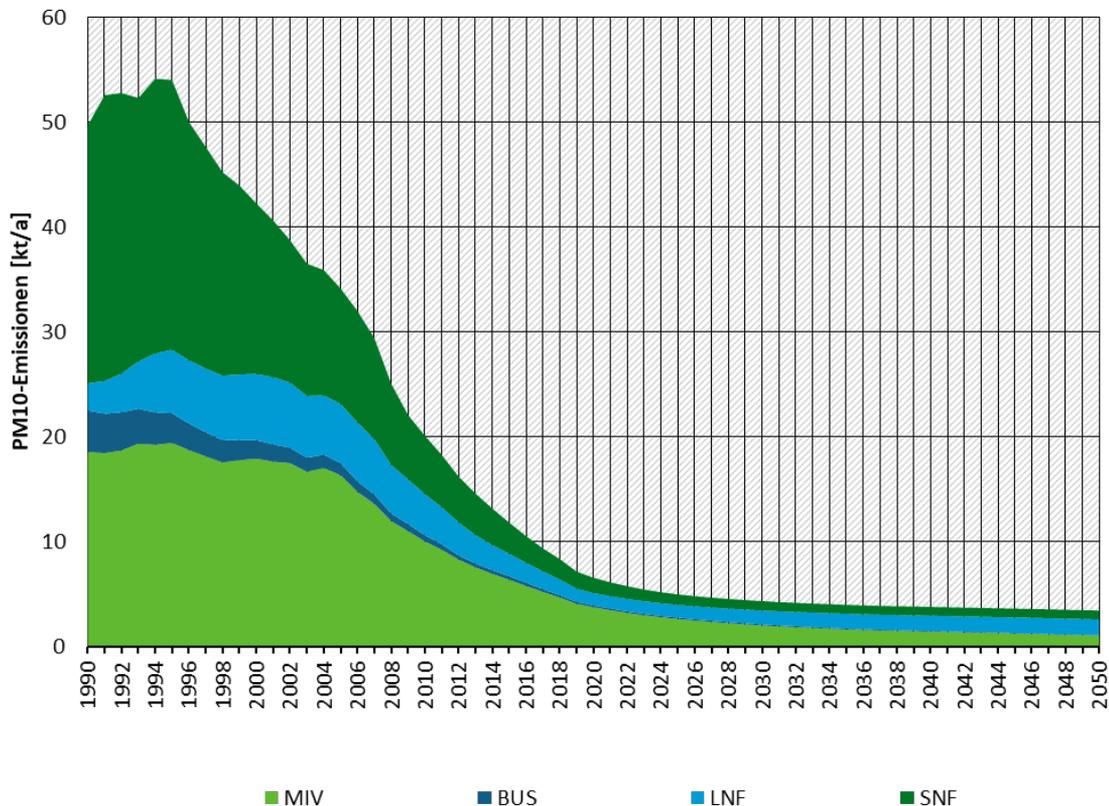


Anmerkungen: Direkte Abgasemissionen im Inland; bis 2018 real, ab 2019 Trendszenario

Quelle: TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

Abbildung 16 zeigt die Entwicklung der Abgaspartikelemissionen. Bis 1995 stiegen die Emissionen an und gehen seitdem zurück. Bis zum Jahr 2005 war diese Entwicklung vor allem getrieben durch die Fortschritte in der Abgasgesetzgebung bei den schweren Nutzfahrzeugen. Seit 2006 gehen die Emissionen auch bei den Pkw durch die zunehmende Verwendung von Partikelfiltern stärker zurück als in der Dekade davor. Insgesamt nahmen die Abgaspartikelemissionen von 50 Kilotonnen im Jahr 1991 auf 8,3 Kilotonnen im Jahr 2018 und damit um 83 % ab. Unter den Randbedingungen des Trendszenarios wird bis zum Jahr 2050 ein weiterer Rückgang um 59 % gegenüber 2018 auf 3,4 Kilotonnen berechnet.

Abbildung 16: Abgaspartikelemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen bis 2018 und im Trend-Szenario bis 2050



Anmerkungen: Direkte Abgasemissionen im Inland; bis 2018 real, ab 2019 Trendszenario
Quelle: TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

4.4 Treibhausgasemissionen des Verkehrs nach Territorialprinzip

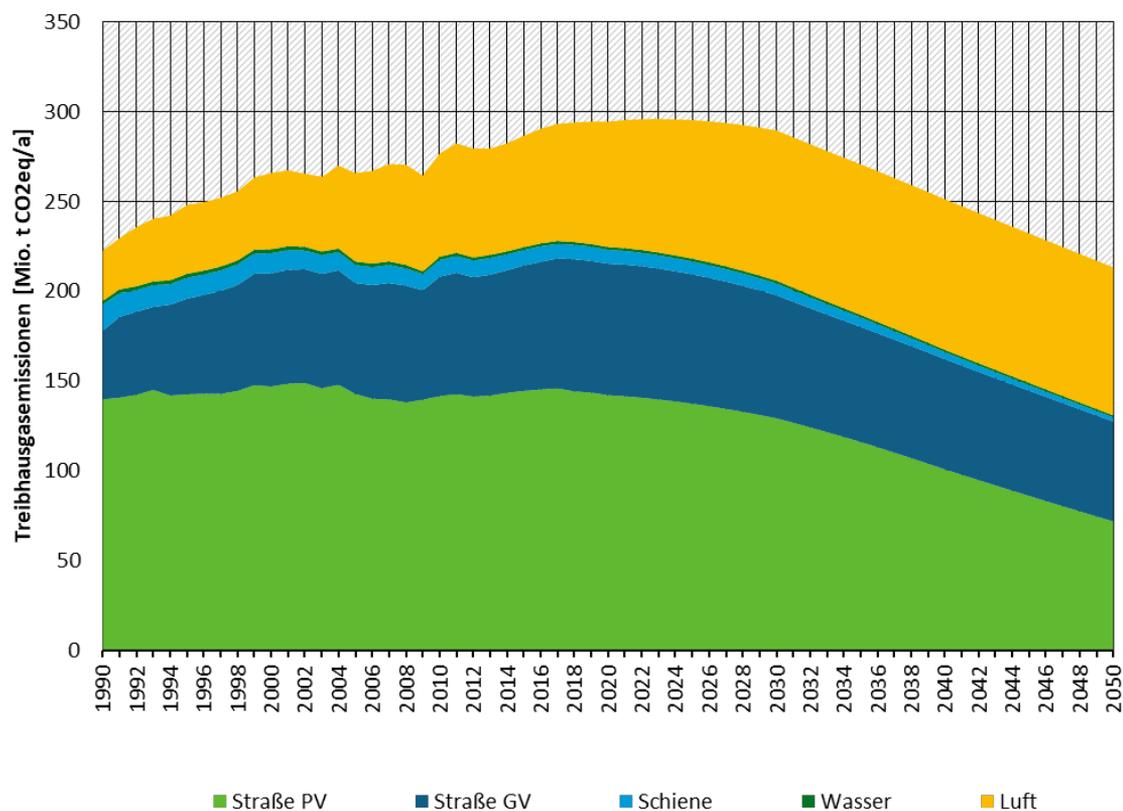
Abbildung 17 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2050 einschließlich der Emissionen für die Bereitstellung der Energieträger für die Verkehrsträger Straße PV (Straßenpersonenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw und Bussen auf inländischem Territorium), Straße GV (Straßengüterverkehr mit leichten und schweren Nutzfahrzeugen auf inländischem Territorium), Schiene (Eisenbahn, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen), Wasser (Güterverkehr mit Binnenschiffen), Schiene (Eisenbahn, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen auf inländischem Territorium), Wasser (Güterverkehr mit Binnenschiffen auf inländischem Territorium) und Luft (von Deutschland abgehender Flugverkehr bis zur ersten Zwischenlandung, einschließlich der zusätzlichen Klimawirkung in Reiseflughöhe). Pro Verkehrsträger zeichnet sich folgende Entwicklung ab:

- Der Straßenverkehr hat über die gesamte Zeitreihe den größten Anteil an den Treibhausgasemissionen (80 % im Jahr 1990 bis 60 % Anteil im Jahr 2050), gefolgt vom Flugverkehr. Die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs nahmen von 1990 bis 2018 um 22 % zu. Bis zum Jahr 2050 wird unter den Randbedingungen des Trendszenarios eine Abnahme von 42 % gegenüber 2018 berechnet.

- ▶ Der Flugverkehr nahm von 1990 bis 2018 um 138 % zu. Bis zum Jahr 2030 wird unter den Randbedingungen des Trendszenarios eine weitere Zunahme von 24 % gegenüber 2018 berechnet. Danach bleiben die Treibhausgasemissionen des Flugverkehrs nahezu konstant.
- ▶ Bei Bahn und Binnenschifffahrt gingen die Treibhausgasemissionen von 1990 bis 2018 um 44 % bzw. 31 % zurück. Bis zum Jahr 2050 wird unter den Randbedingungen des Trendszenarios eine weitere Abnahme von 72 % bzw. 17 % gegenüber 2018 berechnet.

Die Treibhausgasemissionen nahmen insgesamt für alle betrachteten Verkehrsträger von 1990 bis 2018 um 32 % zu. Bis zum Jahr 2050 wird unter den Randbedingungen des Trendszenarios eine Abnahme von 27 % gegenüber 2018 berechnet. Für alle Verkehrsträger zusammen liegen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 um 4 % unter dem Niveau von 1990. Der Verlauf der Treibhausgasemissionen ist ähnlich dem Verlauf des Energieverbrauchs (siehe Kapitel 4.2).

Abbildung 17: Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung der Gesamtemissionen bis 2018 und im Trend-Szenario bis 2050



Anmerkungen: Gesamtemissionen einschließlich der Emissionen für die Energiebereitstellung für Straße (Straßenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen sowie Bussen auf inländischem Territorium), Schiene (Eisenbahn, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen auf inländischem Territorium), Wasser (Güterverkehr mit Binnenschiffen auf inländischem Territorium) und Luft (von Deutschland abgehender Flugverkehr bis zur ersten Zwischenlandung, einschließlich der zusätzlichen Klimawirkung in Reiseflughöhe); bis 2018 real, ab 2019 Trendszenario
Quelle: TREMOD 6.03 vom 31.01.2020

4.5 Treibhausgasemissionen des Verkehrs im nationalen Inventarbericht (NIR)

Im Rahmen der internationalen Berichtspflichten werden die Treibhausgasemissionen des Verkehrs nach folgenden Regeln ermittelt:

- ▶ Die Ermittlung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs erfolgt grundsätzlich auf Basis der in der Energiestatistik erfassten Verbrauchsmengen.
- ▶ Die Schifffahrt wird im Gegensatz zu TREMOD unterteilt in den nationalen Seeverkehr, die Binnenschifffahrt sowie die internationale Seeschifffahrt, wobei die Emissionen der letzteren nur nachrichtlich erfasst werden. In TREMOD hingegen werden auch internationale Binnenschiffsverkehre auf deutschem Territorium erfasst.
- ▶ Beim Flugverkehr werden nur die Verkehre zwischen inländischen Flughäfen erfasst.
- ▶ Zusätzlich werden im unter der Quellgruppe „Übriger Verkehr“ die Emissionen von Gasturbinen in Erdgasverdichterstationen des Transportnetzes berücksichtigt.
- ▶ Die regenerativen CO₂-Emissionen der Biokraftstoffe werden mit Null bewertet.

Mit dieser Abgrenzung unterscheiden sich die berichteten Emissionen in der Höhe und im Verlauf von den im Kapitel 4.4 dargestellten TREMOD-Ergebnissen (Territorialprinzip bei Straße, Schiene und Binnenschifffahrt, zusätzliche Berücksichtigung des abgehenden internationalen Flugverkehrs einschließlich der zusätzlichen Klimawirkung in großen Flughöhen und zusätzlich die THG-Emissionen der Energiebereitstellung).

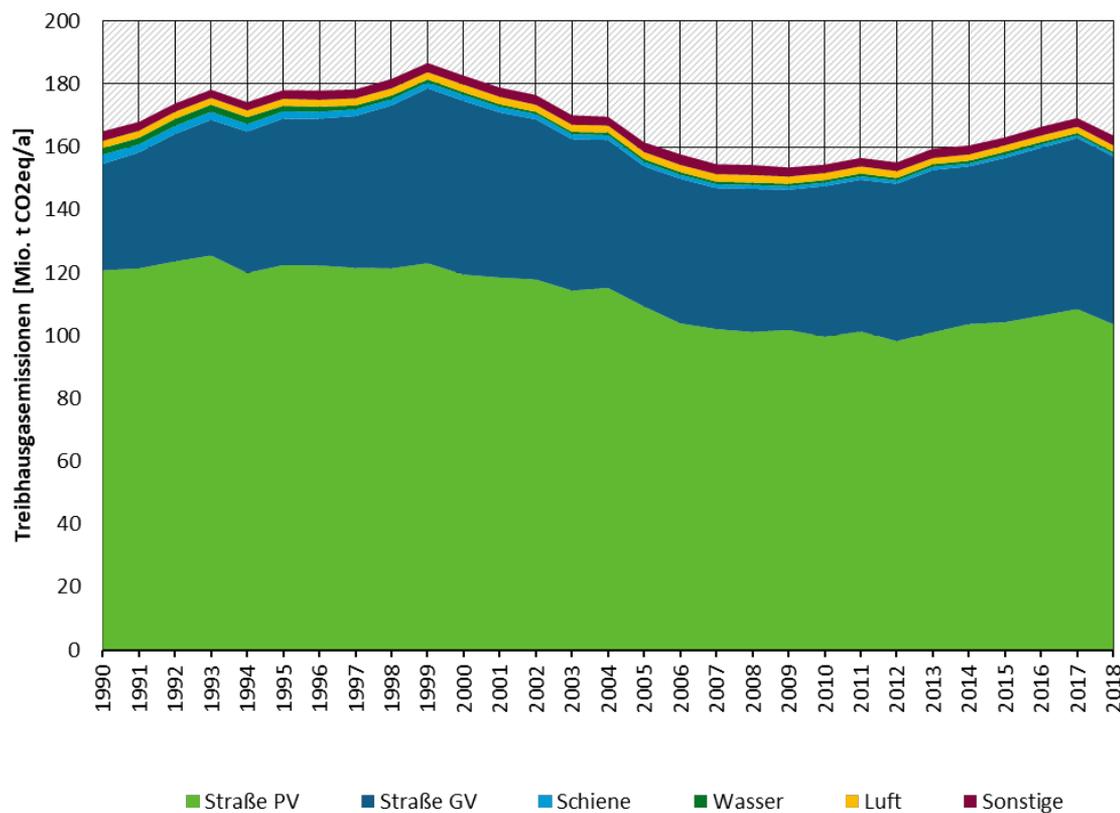
Abbildung 18 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2018 für die Verkehrsträger Straße PV (Straßenpersonenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw und Bussen), Straße GV (Straßengüterverkehr mit leichten und schweren Nutzfahrzeugen, Schiene (Eisenbahn, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen), Wasser (Güterverkehr mit Binnenschiffen), Luft (Flugverkehr im Inland) und sonstige nicht in TREMOD erfassten Verkehre (v.a. Rohrfernleitungen, Teile der Schifffahrt) in der Abgrenzung der Berichterstattung im nationalen Inventarbericht:

- ▶ Der Straßenverkehr hat über die gesamte Zeitreihe den größten Anteil an den Emissionen (95 % im Jahr 1990 bis 98 % Anteil im Jahr 2018). Die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs nahmen von 1990 bis 1999 um 25 % zu. Einer Abnahme bis 2009 um 8 % gegenüber 1999 folgte eine erneute Zunahme bis 2017 um 10 %. Insgesamt lag der Energieverbrauch des Straßenverkehrs im Jahr 2018 um nur 1,5 % über dem Niveau von 1990, während bei den THG-Gesamtemissionen in der TREMOD-Abgrenzung eine Steigerung um 22% im selben Zeitraum berechnet wird (siehe Kapitel 4.4).
- ▶ Der Schienen-, Schiffs- und inländische Flugverkehr haben im nationalen Inventar nur einen geringen Anteil, der außerdem bei allen drei Verkehrsträgern seit 1990 abgenommen hat.

In der Folge sind die Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland im nationalen Inventar von 1990 bis 2018 um 0,9 % zurückgegangen, während sie in der TREMOD-Abgrenzung um 32% angestiegen sind (siehe Kapitel 4.4). Für die unterschiedliche Entwicklung der Treibhausgasemissionen zwischen TREMOD und NIR gibt es zwei wesentliche Gründe:

- ▶ Zum einen durch die Diskrepanz zwischen dem Endenergieverbrauch nach der Energiebilanz gegenüber dem Inlandsverbrauch nach TREMOD. Hierbei lag der Inlandsverbrauch 1990 noch niedriger als der Absatz gemäß Energiebilanz und 2018 höher (vgl. Kapitel 2.1.5). Beim Vergleich zweier Stichjahre ist jedoch zu beachten, dass die Energiebilanz in der Regel stärkere jährliche Schwankungen aufweist als nach dem Territorialprinzip – auf Basis von Verkehrsleistungen – berechnete Endenergieverbrauch.
- ▶ Zum anderen wird im NIR nur der nationale Flugverkehr mit seinen im betrachteten Zeitraum leicht abnehmenden Emissionen erfasst, in TREMOD jedoch der gesamte abgehende Flugverkehr mit seiner deutlichen Zunahme seit 1990.

Abbildung 18: Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung bis 2018 in der Abgrenzung der Emissionsberichterstattung



Anmerkungen: Direkte Emissionen für Straße (Straßenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen sowie Bussen in der Abgrenzung der Energiebilanz), Schiene (Eisenbahn in der Abgrenzung der Energiebilanz), Wasser (Güterverkehr mit Binnenschiffen in der Abgrenzung der Energiebilanz), Luft (Inlandsverkehr) und Sonstige (Gasturbinen in Erdgasverdichterstationen und weitere Abgrenzungsdifferenzen zu TREMOD, v.a. bei der Schifffahrt).

Quelle: TREMOD 6.03 vom 31.01.2020; Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 – 2018; Stand EU-Submission: 15.01.2020

5 Quellenverzeichnis

- AG Energiebilanzen (n.d.): Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. Erscheinungsweise jährlich.
- Allekotte, M.; Bergk, F.; Biemann, K.; Deregowski, C.; Knörr, W.; Althaus, H.-J.; Sutter, D.; Bergmann, T. (2019): Ökologische Bewertung von Verkehrsarten. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Althaus, H.-J.; Oberpiller, Q.; Läderach, A.; Hausberger, S.; Matzer, C.; Tiertge, U.; Dornoff, J.; Diaz, S.; Mock, P.; Allekotte, M.; Heidt, C.; Knörr, W.; Eisenmann, C.; Kuhnimhof, T. (2019): Erarbeitung einer Methode zur Ermittlung und Modellierung der CO₂-Emissionen des Kfz-Verkehrs. ICCT, INFRAS, ifeu, TU Graz, DLR im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- BAFA (n.d.): Amtliche Mineralöl Daten für die Bundesrepublik Deutschland; Jahresbericht. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). Erscheinungsweise jährlich, im Monatsbericht Dezember.
- Bäumer, M.; Hautzinger, H.; Pfeiffer, M.; Stock, W.; Lenz, B.; Kuhnimhof, T.; Köhler, K. (2016): Fahrleistungserhebung 2014: Begleitung und Auswertung - Schlussbericht zur Inlandsfahrleistung. Mannheim.
- BAZL (2009): Datenbank für Flugzeugkolbenmotoren. <https://www.bazl.admin.ch/bazl/de/home/fachleute/regulation-und-grundlagen/umwelt/schadstoffemissionen/triebwerkemissionen/zusammenfassender-bericht--anhaenge-und-datenblaetter.html>.
- BAZL (2017): Anleitung zur Abschätzung von Helikopteremissionen - Helicopter Emissions Table. <https://www.bazl.admin.ch/bazl/de/home/fachleute/regulation-und-grundlagen/umwelt/schadstoffemissionen/triebwerkemissionen/anleitung-zur-abschaetzung-von-helikopteremissionen.html>.
- Bergk, F.; Biemann, K.; Heidt, C.; Knörr, W.; Lambrecht, U.; Schmidt, T.; Ickert, L.; Schmied, M.; Weindorf, W. (2016): Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. Umweltbundesamt. S. 218. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/texte_56_2016_klimaschutzbeitrag_des_verkehrs_2050_getagged.pdf.
- BLE (2017): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2017. . Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung.
- Blue Swan Daily (2019): Air France-KLM reduces fuel consumption per pax per 100km by half a litre from 2011 to 2018.
- BMWi (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. <http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/langfrist-und-klimaszenarien.html>.
- BMWi (2018): Gesamtwirtschaftliches Produktionspotenzial und Konjunkturkomponenten. Datengrundlagen und Ergebnisse der Schätzungen der Bundesregierung. Herbstprojektion der Bundesregierung vom 11.10.2018. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie Bundesministerium der Finanzen.
- Bundesamt für Güterverkehr (2018): Mautstatistik, Jahrestabellen 2017.
- Bundesregierung (2017): Projektionsbericht 2017 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013.
- Capros, P.; De Vita, A.; Tasios, N.; Siskos, P.; Kannavou, M.; Petropoulos, A.; Evangelopoulou, S.; Zampara, M. (2016): EU Reference Scenario 2016. Europäische Kommission. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160713%20draft_publication_REF2016_v13.pdf.
- Council of the EU (2018): CO₂-Emissionsnormen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge: Einigung im Rat. Pressemitteilung 548/18 10.10.2018, Brüssel.

- <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2018/10/10/co2-emission-standards-for-cars-and-vans-council-agrees-its-position/pdf> (19.11.2018).
- DB Umwelt (2019): Jährlich Auswertung der DB- Aktivitätsdaten für TREMOD.
- DESTATIS (2018): Verkehr: Eisenbahnverkehr 2017. Fachserie 8, Reihe 2 Statistisches Bundesamt.
- Destatis (2018): Luftverkehr auf allen Flugplätzen 2017. Wiesbaden.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Personenverkehr/Publikationen/Downloads-Luftverkehr/luftverkehr-alle-flugplaetze-2080620177004.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
- DESTATIS (2019a): Bevölkerungspyramide. In: 2015.
<https://service.destatis.de/bevoelkerungspyramide/> (15.01.2019).
- Destatis (2019): Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2018. Wiesbaden.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Personenverkehr/Publikationen/Downloads-Luftverkehr/luftverkehr-ausgewaehlte-flugplaetze-2080610187004.pdf?__blob=publicationFile.
- DESTATIS (2019b): Niedrigwasser beschert Binnenschifffahrt Rekordminus. In: *Statistisches Bundesamt*.
https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2019/03/PD19_112_463.html . (17.01.2020).
- DESTATIS (2019c): Güterverkehr: Beförderungsmenge und Beförderungsleistung nach Verkehrsträgern.
- Deutscher Bundestag (2018): Deutscher Bundestag (2018): Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 19. Legislaturperiode. In: Deutscher Bundestag.
https://www.bundestag.de/blob/543200/9f9f21a92a618c77aa330f00ed21e308/kw49_koalition_koalitionsvertrag-data.pdf.
- easyJet (2019): Sustainability - Environment. <http://corporate.easyjet.com/corporate-responsibility/environment>.
- 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).
- ENVI (2018): REPORT on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council setting CO2 emission performance standards for new heavy-duty vehicles.
- EU (2018): RICHTLINIE (EU) 2018/2001 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen.
- EU (2019): VERORDNUNG (EU) 2019/1242 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 20. Juni 2019 zur Festlegung von CO2-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU) 2018/956 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Richtlinie 96/53/EG des Rates. Europäischer Rat, Parlament und Kommission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242&from=EN>.
- Europäische Kommission (2017): Impact Assessment accompanying the document Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council setting emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles as part of the Union's integrated approach to reduce CO2 emissions from light-duty vehicles and amending Regulation (EC) No 715/2007 (recast). Brüssel.
<https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/10102/2017/EN/SWD-2017-650-F1-EN-MAIN-PART-1.PDF>.

- European Commission (2018): Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL setting CO₂ emission performance standards for new heavy-duty vehicles. Brussels.
- European Environment Agency (2017): EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - 2016. In: *1.A.3.a Aviation - Annex 5 - Master emission calculator 2016*.
<https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation-1-annex5/view>.
- Eurostat (2015): Supply, transformation and consumption of electricity - annual data [nrg_105a]. <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>.
- Fehrenbach, H.; Köppen, S.; Markwardt, S.; Vogt, R. (2016): Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm). UBA Texte 09/2016 Im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Finnair (2018): Sustainability Report 2018.
<https://company.finnair.com/resource/blob/1353302/a5d7eae9c5038a568a614004cb56f1fb/finnair-sustainability-report-2018-data.pdf>.
- Fitschen, A.; Nordmann, H. (2018): Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2015. BAST-Bericht V 304 Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- Flixbus (2019): Aktivitätsdaten zum Fernlinienbusverkehr von Flixbus für das Jahr 2018 für TREMOD.
- Heidt, C.; Knörr, W.; Biemann, K.; Notter, B. (2016): Weiterentwicklung des TREMOD-Binnenschiffmoduls. S. 54.
- Helms, H.; Heidt, C. (2014): Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand.
- Heusch-Boesefeldt (1996): Ermittlung der Pkw- und Nfz-Jahresfahrleistungen 1993 auf allen Straßen in der Bundesrepublik Deutschland. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Aachen.
- IASG (2006): Engine Yearbook 2006.
- IATA (2013): IATA Technology Roadmap 2013.
<http://www.iata.org/whatwedo/environment/Documents/technology-roadmap-2013.pdf> (01.11.2019).
- ICAO (2019): Aircraft Engine Emissions Databank. <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>.
- IFEU (2003): Erarbeitung von Basisemissionsdaten des dieselbetriebenen Schienenverkehrs unter Einbeziehung möglicher Schadstoffminderungstechnologien – Weiterführung und Auswertung des UBA-FuE-Vorhabens 299 43 111. Im Auftrag der Deutschen Bahn AG, Heidelberg.
- ifeu (2016): Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMOD) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014). Im Auftrag des Umweltbundesamtes. In Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut, Heidelberg. S. 1–97.
- Intrapolan (2019): Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr - Mittelfristprognose Winter 2018/19. im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur FE Nr. 97.0 398 /20 1 8 München.
- IPCC (2007): Climate change 2007 - The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
https://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm.

- IVT (1994): Fahrleistung und Unfallrisiko von Kraftfahrzeugen; Schlussbericht zur Fahrleistungserhebung 1993. Im Auftrag der BAST, Bergisch Gladbach.
- IVT (2004a): Fahrleistungserhebung 2002, Band 2: Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko. Untersuchung im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heilbronn, Mannheim.
- IVT (2004b): Fahrleistungserhebung 2002, Teil Begleitung und Auswertung, Band 1: Inländerfahrleistung 2002. Untersuchung im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heilbronn, Mannheim.
- Jamet, M.; Knörr, W. (2019): Überleitung der Fahrleistungserhebung nach TREMOD. Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Kalinowska, D.; Kloas, J.; Kuhfeld, H.; Kunert, U. (2005): Aktualisierung und Weiterentwicklung der Berechnungsmodelle für die Fahrleistungen von Kraftfahrzeugen und für das Aufkommen und für die Verkehrsleistungen im Personenverkehr (MIV). Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin.
- Kathmann, T.; Ziegler, H.; Thomas, B. (2007): Straßenverkehrszählung 2005 - Ergebnisse. Bundesanstalt für Straßenwesen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft V164., Bergisch Gladbach.
- KBA (2018): Verkehr in Kilometern - Inländerfahrleistung 2014-2017. Kraftfahrt-Bundesamt.
- KBA (2019a): Verkehr in Kilometern - Inländerfahrleistung 2014-2018. Kraftfahrt-Bundesamt. https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_kurzbericht_pdf.pdf;jsessionid=ADC926985EC56B4274086EAC887A13C3.live21304?_blob=publicationFile&v=17 (13.11.2019).
- KBA (2019b): Methodische Erläuterungen zur Statistik "Verkehr in Kilometern (VK)" Stand: August 2019. https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_methodische_erlaeu_terungen_201908_pdf.pdf?_blob=publicationFile&v=5 (13.11.2019).
- KBA (n.d.): Bestand und Neuzulassungen - Bereitstellung der Jahresdaten für TREMOD.
- Knörr, W.; Heidt, C.; Gores, S.; Bergk, F. (2016): Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMOD) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014). Im Auftrag des Umweltbundesamtes. In Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut. S. 1-97.
- Knörr, W.; Heidt, C.; Schmied, M.; Notter, B. (2013): Aktualisierung der Emissionsberechnung für die Binnenschifffahrt und Übertragung der Daten in TREMOD. ifeu und INFRAS. Im Rahmen des Projekts „Aktualisierung und Recherche zu Emissionsfaktoren von Euro 5- und Euro 6-Fahrzeugen und nachgerüsteten Kfz und Übertragung der Daten ins Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) und in TREMOD“. FKZ 3711 45 105. Im Auftrag des Umweltb.
- Kollmus, B.; Treichel, H.; Quast, F. (2017): Tempolimits auf Bundesautobahnen 2015, Schlussbericht zum Arbeitsprogramm-Projekt F1100.6110020. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- Lensing (1997): Straßenverkehrszählung 1995 - Erhebungs- und Hochrechnungsmethodik. Büro für angewandte Statistik, Aachen. Erschienen in der Schriftenreihe Verkehrstechnik, Heft V 45 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- Lensing (2003): Straßenverkehrszählung 2000 - Ergebnisse. Büro für angewandte Statistik, Aachen. Heft V 101 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- Lensing, N. (2013): Straßenverkehrszählung 2010 - Ergebnisse. DTV Verkehrsconsult GmbH, Aachen. Berichte der BAST, Unterreihe „Verkehrstechnik, Heft V 233, Aachen.
- Ligterink, N.; van Gijlswijk, G.; Kadijk, G. (2019): Emissiefactoren wegverkeer - Actualisatie 2019.

- Lufthansa Group (2019): Nachhaltigkeitsbericht 2019 - Balance.
<https://www.lufthansagroup.com/fileadmin/downloads/de/verantwortung/balance-2019-epaper/#4>.
- Mahmoudi, S.; Frenken, T. (2017): Straßenverkehrszählung 2015 - Ergebnisse. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen.
- 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).
- van Mensch, P.; Abma, D.; Verbeek, R.; Hekman, W. (2018): PROMINENT Report D5.7 Technical evaluation of procedures for Certification, Monitoring & Enforcement. Technical evaluation of the monitoring results on Rhine, Danube and other vessels. Public report version 2, 2018. TNO.
- Notter, B.; Cox, B.; Jamet, M.; Keller, M.; Cox, B. (2019): HBEFA 4.1 Development Report.
- Radke, S. (2018): Verkehr in Zahlen 2018/2019 47. Jahrgang. Berlin.
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Presse/wegekostengutachten.pdf?__blob=publicationFile.
- Räth, N. (2009): Rezessionen in historischer Betrachtung. In: Wirtschaft und Statistik. Statistisches Bundesamt • Wirtschaft und Statistik 3/2009.
- Rolls Royce (2019): Produktinformation Turbine für A330.
- RWTÜV (1993a): Verdampfungs- und Verdunstungsemissionen. Rheinisch-Westfälischer TÜV. Im Auftrag des BUWAL. In der Reihe: Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs in der Schweiz 1990-2010, Arbeitsunterlage 13, Bern.
- RWTÜV (1993b): Ermittlung des Abgasemissionsverhaltens von Nutzfahrzeugen mit Dieselmotor über 3,5 t zul. Gesamtgewicht im Bezugsjahr 1986. Im Auftrag des TÜV Rheinland.
- RWTÜV; TÜV Rheinland (1993): Ermittlung der Emissionsfaktoren für Motorräder in der Bundesrepublik Deutschland (Ergänzungsmessungen). Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Abschlussbericht.
- Schäfer, M. (2013): Forecast of Air Traffic's CO₂ and NO_x Emissions until 2030. DLR.
- Schubert, M. (2014): Verkehrsverflechtungsprognose los3-2030: Schlussbericht - Im Auftrag vom BMVI. Intraplan Consult GmbH, BVU Beratergruppe Verkehr+Umwelt GmbH.
- Statistisches Bundesamt (2019): Personenverkehr mit Bussen und Bahnen 2017. In: *Fachserie 8, Reihe 3.1*. No.2019.
- Strogies, M.; Gniffke, P. (2019): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019. S. 947.
- T&E (2018): How to decarbonise European transport by 2050. Transport & Environment.
- TÜV Rheinland (1994): Abgas-Emissionsfaktoren von PKW in der Bundesrepublik Deutschland; - Abgasemissionen von Fahrzeugen der Baujahre 1986 bis 1990. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. UBA-Bericht 8/94, Berlin.
- TÜV Rheinland (1995): Abgas-Emissionsfaktoren von Nutzfahrzeugen in der Bundesrepublik Deutschland - Abgasemissionsfaktoren von Dieselmotoren bis Baujahr 1990. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- UBA (2005): Internes Arbeitspapier zum zivilen Luftverkehr. UBA, Berlin.
- Weidema, B. P.; Bauer, C.; R., Hischer.; Mutel, C.; Nemecek, T.; Reinhard, J.; Vadenbo, C. O.; Wernet, G. (2013): Overview and methodology - Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. St. Gallen.
https://www.ecoinvent.org/files/dataqualityguideline_ecoinvent_3_20130506.pdf.

Wietschel, M.; Kluschke, P.; Oberle, S.; Ashley-Belbin, N. (2018): Auswertung von studien und szenarien der Energiesystemanalyse mit Schwerpunkt "Mobilität." Fraunhofer ISI und IREES, Karlsruhe.

A Aktualisierung und Erweiterung des Busverkehrs

A.1 Übersicht

Im Rahmen des Vorhabens (Allekotte et al. 2019) wurde der Busverkehr in Deutschland differenziert untersucht, mit dem Ziel, den Fernlinienbusverkehr, den Nahlinienbusverkehr und den übrigen Busverkehr getrennt zu erfassen und mit den vorliegenden Statistiken abzugleichen. Dazu wurden die Eckwerte wie Bestand, Fahrleistung, Beförderungsleistung sowie Beförderungsangebot der Busse ab dem Jahr 2012 in TREMOD neu abgeleitet und nach folgenden Kategorien untergliedert: Fernlinienbusse (FLBus), Linienbusse (LBus) und sonstige Reisebusse (SRbus).

Die Methodik zur Berechnung dieser Eckwerte ist in den nächsten Kapiteln erläutert. Die folgenden Hauptquellen wurden ausgewählt, um eine jährliche Aktualisierung zu ermöglichen:

- ▶ Für den Bestand: eine Sonderauswertung des KBA für TREMOD (KBA n.d.)
- ▶ Für die Fahrleistung, das Beförderungsangebot sowie die Beförderungsleistung: (Statistisches Bundesamt 2019)

Der Liniennahverkehr hat den höchsten Bestand und die höchste Fahrleistung, während Fernlinienbusse hingegen eine deutlich höhere durchschnittliche Jahresfahrleistung aufweisen. Der Anteil der ausländischen Bussen ist in der Kategorie sonstige Busse mit einem pauschalen Anteil von 12% der gesamten Fahrleistung berücksichtigt. Der Anteil wurde aus dem Unterschied zwischen den aus KBA Fahrleistung (Verkehr in Kilometern) und die aus der innerhalb dieses Projektes berechneten Inlandsfahrleistung der Inländer abgeleitet. Die detaillierte Methodik ist in den nächsten Kapiteln erläutert.

A.2 Bestand je Buskategorie

Der Bestand aus der KBA-Auswertung, die für TREMOD jährlich vorliegt (KBA n.d.), wurde mit detaillierten Spezifikationen ergänzt, um den Bestand nach den drei oben genannten Kategorien unterteilen zu können. Es wurde angenommen, dass alle Busse, die Doppel-Türen haben oder Niederflrbusse sind, als Linienverkehrsbusse eingesetzt sind. Alle andere Busse sind Reisebusse. Die Daten lagen in dieser Form für den 1.1.2019 und den 1.1.2015 vor.

Um diese zwischen Fernlinienbussen und sonstige Bussen weiter unterzuteilen, wurde zunächst der Bestand der Fernlinienbusse auf Basis der Flotte von Flixbus im Jahr 2017 und 2018 abgeschätzt. Diese Daten lagen analog zu den KBA-Beständen nach zulässigem Gesamtgewicht, Baujahr und Eurostandard und damit weitgehend in der für TREMOD erforderlichen Differenzierung vor. Dabei wurde unterstellt, dass die Flotte von Flixbus nur 95% des gesamten Fernlinienbusbestandes umfasst und der Bestand entsprechend extrapoliert. Der Bestand der sonstigen Busse ergibt sich aus der Differenz aller Reisebusse (Summe der KBA anmeldeten Kraftomnibusse minus den berechneten Bestand der Linienbusse) und dem Bestand der Fernlinienbusse.

Tabelle 83 zeigt zusammenfassend einige Merkmale der verschiedenen Busflotten im Jahr 2018. Die Mehrheit aller Busse hat ein zulässiges Gesamtgewicht von über 18 Tonnen, bei den Linienbussen ist der Anteil mit 70% am höchsten. Der Anteil von Bussen mit Emissionsstandard

Euro V und Euro VI ist bei der Fernlinienbusflotte mit 97% am höchsten, da die Fahrzeuge sehr schnell ersetzt werden und in der Regel nicht älter als 10 Jahre sind. Elektrobusse sind in allen Kategorien noch ein Nischenantrieb. Bei den Linienbussen ist die Anzahl mit 137 Bussen am höchsten, die sonstigen Reisebusse haben jedoch einen ähnlichen Anteil an Elektrobussen, was möglicherweise auf Fahrzeuge für Werk- oder Sonderverkehre zurückzuführen ist.

Tabelle 83: Bestand der Busse zur Jahresmitte 2018 in TREMOD nach ausgewählten Merkmalen

Buskategorie	Gesamt	>18 t zGG Anzahl	>18 t zGG Anteil	Euro V/VI Anzahl	Euro V/VI Anteil	Elektrisch Anzahl	Elektrisch Anteil
Linienbusse	53.709	37.587	70,0%	34.451	64%	137	0,3%
Fernlinienbusse	798	518	65,0%	775	97%	1	0,1%
Sonstige Reisebusse	25.471	14.575	57,2%	18.535	73%	76	0,3%

Quelle: (KBA n.d.), (Flixbus 2019) und eigene Annahmen

Die durch die KBA- und Flixbusdaten nicht abgedeckten Bezugsjahre wurden mittels Interpolation abgeschätzt.

Tabelle 84: Bestand der Busse 2012 bis 2018 in TREMOD nach Buskategorien

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Linienbusse	51.039	50.889	51.411	52.138	52.687	53.118	53.709
Fernlinienbusse	857	942	950	887	858	827	798
Sonstige Reisebusse	24.110	24.577	24.787	24.897	25.102	25.249	25.471
Gesamt	76.005	76.409	77.147	77.923	78.647	79.194	79.979

Quelle: (KBA n.d.), (Flixbus 2019) und eigene Annahmen

A.3 Fahrleistung je Buskategorie

Die Inlandsfahrleistungen der Busse lassen sich aus den Statistiken von DESTATIS (Statistisches Bundesamt 2019) und den entsprechenden Bänden der Vorjahre herausziehen (siehe Tabelle 85). Die Jahresfahrleistung der Busse lag danach im Jahr 2014 bei 3,1 Mrd. km (ohne Fahrstrecken im Ausland). Das sind rund eine Milliarde Fahrzeugkilometer weniger als in der Fahrleistungserhebung (Bäumer et al. 2016) und bei (KBA 2018). Verkehre, die bei DESTATIS nicht erfasst sind, sind z.B. Werksverkehr, Privatverkehr und andere nicht meldepflichtige oder nicht gemeldete Fahrten, sowie der Busverkehr ausländischer Fahrzeuge in Deutschland.

Tabelle 85: Statistisch erfasste Inlandsfahrleistungen der Busse nach Verkehrsart

In Mrd. km	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Nahlinienverkehr	2,490	2,485	2,518	2,533	2,529	2,498
Fernlinienverkehr	0,028	0,073	0,1458	0,1654	0,194	0,143
Gelegenheitsverkehr	0,469	0,482	0,4649	0,4933	0,474	0,454
Gesamt	2,987	3,040	3,129	3,192	3,197	3,096

Quelle: (Statistisches Bundesamt 2019)

Es wird angenommen, dass der Nah- und Fernlinienverkehr bei DESTATIS vollständig erfasst ist. Es fehlen also Teile des sonstigen Busverkehrs. Diese werden wie folgt abgeschätzt:

Die mittlere Fahrleistung der sonstigen Reisebusse lässt sich aus der mittleren durchschnittlichen Fahrleistung aus der Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al. 2016) für Gelegenheits-, Freigestellter, Werk- und sonstiger Verkehr ableiten. Sie lag 2014 bei 48.082 km pro Fahrzeug und Jahr. Diese mittlere Fahrleistung wird mit dem Bestand der sonstigen Reisebusse nach KBA (siehe Tabelle 86) multipliziert. Es ergibt sich eine Gesamtfahrleistung von knapp 1,2 Mrd. km im Jahr 2014 (siehe Tabelle 86). Dies ist deutlich mehr als die Fahrleistung des Gelegenheitsverkehrs nach DESTATIS (2014: 0,465 Mrd. km).

Tabelle 86: Mittlere Jahresfahrleistung der Busse

In km/Fzg	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Linienbusse	48.786	48.832	48.978	48.582	48.000	47.028	46.509
Fernlinienbusse	32.456	77.677	153.519	186.518	226.056	173.386	181.817
Sonstige Reisebusse	47.169	47.625	48.082	48.082	48.082	48.082	48.082

Quelle: (Statistisches Bundesamt 2019); Eigene Berechnungen

Zu den durch KBA vorgegebenen 4,2 Mrd. Buskilometern verbleibt eine Differenz von rund 0,3 Mrd. Kilometern. Dies entspricht in etwa der Größenordnung, die in der Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al. 2016) für die Fahrleistung der ausländischen Busse in Deutschland ermittelt wurde.

Die Gesamtfahrleistung in TREMOD setzt sich somit zusammen aus den statistisch erfassten Fahrleistungen der Nah- und Fernlinienbusse und den hochgerechneten Fahrleistung für den sonstigen Busverkehr, einschließlich der Fahrleistungen der ausländischen Busse.

Mit diesen Annahmen werden die Fahrleistungen bis 2018 fortgeschrieben. Es wird jedoch empfohlen, die Annahmen beim nächsten Update nochmals an die revidierten Fahrleistungsdaten des KBA (KBA 2019a) anzupassen, da diese nach 2014 deutlich stärker ansteigen als mit den oben dargestellten Annahmen für TREMOD berechnet wurde.

Die Ergebnisse der aktuellen Hochrechnung sind in Tabelle 87 zusammengefasst.

Tabelle 87: Hochgerechnete Inlandsfahrleistungen der Busse nach Fahrzeugart

In Mrd. km	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Linienbusse	2,490	2,485	2,518	2,533	2,529	2,498	2,498
Fernlinienbusse	0,028	0,073	0,146	0,165	0,194	0,143	0,145
Sonstige Reisebusse	1,137	1,171	1,192	1,197	1,207	1,214	1,225
Ausländische Busse	0,326	0,326	0,326	0,331	0,337	0,335	0,338
Gesamt	3,981	4,055	4,182	4,227	4,267	4,190	4,206

Quelle: (Statistisches Bundesamt 2019), eigene Berechnungen

A.4 Beförderungsangebot und Beförderungsleistung je Buskategorie

Das Beförderungsangebot (Platz-km) und die Beförderungsleistung (Personen-km) für den Liniennah- und -fernverkehr sowie den Gelegenheitsverkehr können aus (Statistisches Bundesamt 2019) entnommen werden. Zusammen mit der Fahrleistung lässt sich das Platzangebot und die Auslastung rückrechnen. Hierbei besteht möglicherweise eine gewisse Unschärfe, da sich Fahrleistung und Beförderungsangebot auf die Fahrstrecken im Inland beziehen, die Verkehrsleistung auf die reinen Inlandsrelationen. Es fehlen also die Verkehrsleistungen der grenzüberschreitenden und Fahrten auf den Inlandsabschnitten. Dieser Umstand wird hier vernachlässigt, da sich der Unterschied innerhalb der statistischen Unschärfe bewegen sollte. Die Kennzahlen sind in Tabelle 88 zusammengefasst.

Tabelle 88: Statistisch erfasste Betriebs- und Beförderungsleistung der Busse (Inlandsverkehr) 2012 bis 2017

Kenngröße	Verkehrsart	2012	2013	2014	2015	2016	2017
FL (Mrd. km)	Linie nah	2,490	2,485	2,518	2,533	2,529	2,498
FL (Mrd. km)	Linie fern	0,028	0,073	0,146	0,165	0,194	0,143
FL (Mrd. km)	Gelegenheit	0,469	0,482	0,465	0,493	0,474	0,454
VL (Mrd. Pkm)	Linie nah	38,435	38,334	38,601	38,221	38,096	37,511
VL (Mrd. Pkm)	Linie fern	0,431	1,736	3,482	4,485	5,130	4,647
VL (Mrd. Pkm)	Gelegenheit	13,497	13,066	12,619	13,185	12,582	12,022
Kapazität (Mrd. Platz-km)	Linie nah	187,055	186,753	193,603	193,541	192,557	189,639
Kapazität (Mrd. Platz-km)	Linie fern	1,540	3,883	8,003	8,931	10,998	8,224
Kapazität (Mrd. Platz-km)	Gelegenheit	23,062	22,434	21,767	22,996	21,870	20,940
Plätze/Fahrzeug	Linie nah	75	75	77	76	76	76
Plätze/Fahrzeug	Linie fern	55	53	55	54	57	57
Plätze/Fahrzeug	Gelegenheit	49	47	47	47	46	46
Auslastung (%)	Linie nah	21%	21%	20%	20%	20%	20%
Auslastung (%)	Linie fern	28%	45%	44%	50%	47%	57%
Auslastung (%)	Gelegenheit	59%	58%	58%	57%	58%	57%

Quelle: (Statistisches Bundesamt 2019), eigene Berechnungen

In TREMOD werden die Fahr- und Verkehrsleistungen des Liniennah- und -fernverkehrs direkt übernommen. Der Gelegenheitsverkehr ist in TREMOD ein Teil des sonstigen Busverkehrs. Für die Abschätzung der Verkehrsleistung des sonstigen Busverkehrs ohne den statistisch erfassten Gelegenheitsverkehr liegen keine Informationen vor. In der aktuellen TREMOD-Version werden trotzdem die Auslastungskennzahlen des Gelegenheitsverkehrs für eine Hochrechnung der Verkehrsleistungen verwendet. Die Gesamtverkehrsleistung der Busse wird damit vermutlich deutlich überschätzt. Es wird empfohlen, die Kennzahlen für den sonstigen Busverkehr bei der nächsten Aktualisierung nochmals zu überprüfen.

Tabelle 89: Verkehrsleistungen der Busse (Inlandsverkehr) in TREMOD 2012 bis 2018

Mrd. Pkm	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018*
Linienbusse	38,4	38,3	38,6	38,2	38,1	37,5	37,5
Fernlinienbusse	0,4	1,7	3,5	4,5	5,1	4,6	4,6
Sonstige Reisebusse*	49,4	48,3	47,7	48,5	48,5	48,9	48,9

Quelle: (Statistisches Bundesamt 2019), eigene Berechnungen;

*vorläufige Werte

B Aktualisierung der Fahrleistungen im Straßenverkehr

Die Aktualisierung der Fahrleistungen in TREMOD wurde im Rahmen eines Vorhabens der Bundesanstalt für Straßenwesen vorgenommen (Jamet / Knörr 2019). Dieser Abschnitt dokumentiert das Vorgehen und die Ergebnisse der Studie sowie die nach Abschluss des Vorhabens vorgenommenen Aktualisierungen.

B.1 Verwendung von Fahrleistungsdaten in TREMOD

B.1.1 Struktur und Definitionen

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

- ▶ Straßentypen
- ▶ Fahrzeugkategorien
- ▶ Fahrzeugsegmenten
- ▶ Verkehrssituationen
- ▶ Längsneigungsklassen

Die Fahrleistung wird in TREMOD nach den drei Straßenkategorien „Autobahn“, „sonstige Außerortsstraßen“ und „Innerortsstraßen“ und weiter nach Straßentypen differenziert (siehe Tabelle 90).

- ▶ Die Fahrleistungen auf den Bundesautobahnen werden in TREMOD zusätzlich nach der Anzahl der Fahrstreifen unterschieden. Dazu werden die zwei Kategorien ≤ 5 und ≥ 6 Fahrstreifen gebildet. Allerdings liegen für diese Aufteilung nach dem Jahr 2000 keine Informationen vor.
- ▶ Die sonstigen Außerortstraßen werden nach Bundes-, Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen bzw. sonstige Straßen unterschieden. Die Kategorie „sonstige Straßen“ wurde in der Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al. 2016) verwendet und enthält neben den Gemeindestraßen das nicht klassifizierte Straßennetz.
- ▶ Die Innerortsstraßen werden nicht weiter unterteilt. Hier erfolgt die Differenzierung über die Zuordnung der Fahrleistungen zu Verkehrssituationen.

Tabelle 90: Straßenkategorien und Straßentypen in TREMOD

Straßenkategorie	Straßentyp	Beschreibung
AB Bundesautobahnen	A \leq 5 A $>$ 6 \leq 5 Fahrstreifen $>$ = 6 Fahrstreifen	Für die Aufteilung nach Fahrstreifen liegen seit dem Jahr 2000 keine aktuellen Daten vor. Daher wird die Aufteilung für das Jahr 2000 für alle Folgejahre konstant fortgeschrieben

Straßenkategorie	Straßentyp	Beschreibung
AO Außerortsstraßen	B Bundesstraßen L Landesstraßen K Kreisstraßen G Gemeinde-/sonstige Straßen	Freie Strecken der Bundes-, Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen. In der Fahrleistungserhebung 2014 wurden die Gemeindestraßen mit den sonstigen Straßen zusammengefasst
IO Innerortsstraßen	I Innerortsstraßen	Alle Innerortsstraßen inkl. Ortsdurchfahrten der B-, L-, K- und G-Straßen

Die Unterteilung nach Fahrzeugkategorien wird so gewählt, dass zum einen die statistische Datenbasis (Bestände, Fahrleistungen) und zum anderen die Emissionsfaktoren-Datenbasis in ausreichender Differenzierung abgebildet werden. Die TREMOD-Aufteilung entspricht der KBA-Systematik, wie in Tabelle 91 dargestellt, wobei einzelne Kategorien (Busse, Lkw, übrige Kfz) entsprechend den Anforderungen der Emissionsberechnung weiter untergliedert sind.

Eine wichtige Quelle für die Fahrleistungen sind die Berichte der BAST zu den Zählergebnissen des Straßenverkehrs. Die Straßenverkehrserfassung der BAST unterscheidet bei den Straßenverkehrszählungen (SVZ) sechs Fahrzeugkategorien und an den automatischen Dauerzählstellen (VE-BFS) die zwei Fahrzeuggruppen „Leichtverkehr“ und „Schwerverkehr“. Diese lassen sich eindeutig den TREMOD-Kategorien zuordnen (siehe Tabelle 91). Die Fahrleistungserhebung 2014 folgt, wie schon die Vorgängerstudien, bei der Halterbefragung (Inländerfahrleistung) der KBA-Systematik. Die Verkehrszählung (Inlandsfahrleistung 2014) fasst die Kategorien z.T. anders z.B. sind die Lkw < 3,5t zGG mit Anhänger zusammen mit dem Pkw erfasst. Eine Übersicht zur Definition und Zuordnung der verschiedenen Fahrzeugkategorien entsprechend der zu Grunde liegenden Quellen ist in Tabelle 91 dargestellt.

Tabelle 91: Definition und Zuordnung der Fahrzeugkategorien

Abkürzung	TREMOD	KBA	FLE	SVZ	VE-BFS
KKR	Kleinkrafträder	k.a.	Kfz mit Versicherungskennzeichen	Kräder	Leichtverkehr (LV)
KR	Krafträder	Krafträder	Kraftrad mit amtlichen Kennzeichen	Kräder	Leichtverkehr (LV)
PKW	Pkw/Kombi	Pkw/Kombi	Pkw, Pkw mit (Wohn-) Anhänger, Lkw < 3,5t zGG mit Anhänger, Kombinationskraftwagen, Kleinbus und Krankenwagen	Pkw	Leichtverkehr (LV)
Wml	Wohnmobile <3,5t*	Pkw/Kombi	Wohnmobile	Pkw	Leichtverkehr (LV)
UeKfzI	übrige Kfz <3,5t	Übrige Kfz	k.a.	Pkw	Leichtverkehr (LV)
LBus	Linienbusse (Nahverkehr)	Busse	Busse	Busse	Schwerverkehr (SV)
FLBus	Fernlinien-	Busse	Busse	Busse	Schwerverkehr

Abkürzung	TREMOD	KBA	FLE	SVZ	VE-BFS
	busse				(SV)
SRBus	Sonstige Reisebusse	Busse	Busse	Busse	Schwerverkehr (SV)
LkwI	Lkw <3,5 t	Lkw	Lieferwagen Güterkraftfahrzeuge mit einem zGG von höchstens 3,5t ohne Anhänger + Wohnmobile	Lkw <3,5 t	Leichtverkehr (LV)
Lkw	Lkw Solo > 3,5 t	Lkw	Lkw ohne Anhänger Güterkraftfahrzeuge mit einem zGG von mehr als 3,5t	Lkw ohne Anhänger	Schwerverkehr (SV)
LZ	Lastzüge	Lkw	Lastzüge (Lkw mit Anhänger)	Lastzüge	Schwerverkehr (SV)
SZ	Sattelzüge	Sattelzugmaschinen	Sattelkraftfahrzeuge		Schwerverkehr (SV)
Wms	Wohnmobile >3,5 t*	Übrige Kfz*	Sonstige Fahrzeuge	Lkw ohne Anhänger	Schwerverkehr (SV)

*Wohnmobile: in der KBA-Systematik bis 2005 als „übrige Kfz“, in TREMOD bis 2005 separat; nach 2005 als Pkw erfasst;
SVZ: Straßenverkehrszählung; VE BFS: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen

Um eine Zuordnung zu den spezifischen Emissionsfaktoren zu ermöglichen, werden die Gesamtfahrleistungen nach Straßen- und Fahrzeugkategorien, sowie weiter nach Fahrzeugsegmenten differenziert. Hierfür werden folgende Funktionen bzw. Verteilungen genutzt:

- ▶ Aufteilung des Fahrzeugbestandes nach Fahrzeugsegment (Größenklasse, Antriebsart, Alter). Die Pkw werden im HBEFA 4.1 (Notter et al. 2019) nicht mehr nach Größenklassen differenziert. Bei Motorrädern und beim Güterverkehr besteht die Größenklassenunterteilung weiterhin.
- ▶ Fahrleistungsrelationen pro Fahrzeugsegment (Größenklasse für den Güterverkehr, Antrieb).
- ▶ Fahrleistungsverteilung nach Fahrzeugalter.
- ▶ Schließlich werden Anteile an der Fahrleistung pro Fahrzeug- und Straßentyp nach Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen hinterlegt. Die Verkehrssituationen entsprechen hierbei der Systematik für die Emissionsfaktoren in HBEFA und beschreiben Fahrprofile für verschiedene Straßentypen, Geschwindigkeitsbegrenzungen und Verkehrszustände. Ebenso werden längsneigungsabhängige Emissionsfaktoren in HBEFA abgeleitet, für die entsprechende Fahrleistungsanteile ermittelt werden müssen.

B.1.2 Datenquellen

Bisher wurden die Emissionsberechnungen und somit die Fahrleistungen in TREMOD bis 1993 in die Gebiete West- und Ostdeutschland unterteilt, ab 1994 wird Deutschland insgesamt bilanziert. In der Studie (Jamet / Knörr 2019) wurde die Zeitreihe ab 1994 überarbeitet. Daher werden alle relevanten Quellen für die Fahrleistungsrechnung ab diesem Zeitpunkt dargestellt. Darüber hinaus wird beschrieben, wie die Werte in TREMOD verwendet werden.

Im Rahmen dieser TREMOD-Aktualisierung bis 2018 wurde die Unterteilung nach West- und Ostdeutschland 1990 bis 1993 aufgehoben. Das Vorgehen wird in B.2.5 beschrieben.

Fahrleistungsuntersuchung (FLU) 1993

Fahrleistungsuntersuchungen wurden in den Jahren 1986, 1990 und 1993 durchgeführt. Ziel war die Erfassung der gesamten Fahrleistungen in Deutschland. Dabei wurden die Fahrleistungen in Westdeutschland 1986, 1990 und 1993 sowie in Ostdeutschland 1990 und 1993 sehr differenziert nach allen Straßentypen, Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen sowie nach Fahrzeugmerkmalen (Fahrzeugkategorie, Größenklasse, Antrieb) in Abstimmung mit den Emissionsmessprogrammen (TÜV Rheinland 1995), (RWTÜV / TÜV Rheinland 1993), (TÜV Rheinland 1994), (RWTÜV 1993a), (RWTÜV 1993b) ermittelt. Diese Daten waren in allen bisherigen TREMOD-Versionen die wichtigste Grundlage für die Inlandsfahrleistungen des Straßenverkehrs. Relevant für die Zeitreihe ab 1994 ist die Fahrleistungsuntersuchung von 1993 (Heusch-Boesefeldt 1996). Die Ergebnisse für die Gesamtfahrleistung nach Fahrzeug- und Straßentypen in Deutschland 1993 sind Tabelle 92 dargestellt.

Tabelle 92: Fahrleistungen in Deutschland 1993 differenziert nach Fahrzeugkategorien (in Mio. km)

FzKat	Auto- bahn	Bundes- straßen	Landes- straßen	Kreis- straßen	Gemeinde- straßen	Innerorts- straßen	Gesamt
KKR	0,0	294,0	524,6	386,1	428,7	2.255,6	3.889,0
KR	1.597,7	1.834,3	1.665,5	847,7	579,7	1.173,9	7.698,7
PKW	141.626,1	88.418,7	69.441,1	34.629,1	27.088,1	181.688,6	542.891,6
UeKfzl	133,1	95,9	146,5	139,4	148,4	535,3	1.198,6
Wml	1.176,4	727,93	413,10	266,79	93,89	578,39	3.256,5
Rbus	855,8	421,5	276,3	141,8	93,7	431,2	2.220,4
Lbus	125,3	205,9	153,1	75,3	49,7	1.037,9	1.647,2
LNf	5.927,6	3.238,8	2.051,1	1.070,9	760,5	5.906,0	18.954,9
LKW	4.965,9	3.055,4	2.296,5	1.070,7	663,1	5.597,9	17.649,4
UeKfzs	149,0	179,7	213,1	196,4	210,9	788,3	1.737,3
Wms	149,8	92,63	52,57	33,95	11,95	73,60	414,5
LZ	7.674,8	2.019,8	866,4	322,6	177,7	1.930,4	12.991,7
SZ	7.801,1	1.682,6	672,3	248,0	133,3	1.210,5	11.747,8
Gesamt	172.182,5	102.267,1	78.772,0	39.428,7	30.439,6	203.207,7	626.297,6

Quelle: (Heusch-Boesefeldt 1996)

Die Fahrleistungsuntersuchung 1993 war bis zur Fahrleistungserhebung 2014 die letzte Quelle, in der die Fahrleistungen in vergleichbar hoher Auflösung nach Fahrzeug- und Straßentypen differenziert ermittelt wurden.

Straßenverkehrszählungen

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) unterhält auf Bundesfernstraßen ein Zählstellennetz. Jährlich werden auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen die durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärken, differenziert nach „Leichtverkehr“ (LV: Kräder, Pkw, Lkw <3,5t) und „Schwerverkehr“ (SV: Busse, Lkw>3,5t, Lastzüge) erfasst. Alle fünf Jahre wird eine Straßenverkehrszählung durchgeführt, die zusätzlich die Landes- sowie – in einigen Bundesländern – die Kreisstraßen erfasst und nach 6 Fahrzeugkategorien unterscheidet.

Straßenverkehrszählung 1995

Für 1995 wurden die Fahrleistungen auf Autobahnen, Bundes- und Landesstraßen sowie der Kreisstraßen in den alten Bundesländern, unterteilt nach den sechs in der Tabelle 6 stehenden Fahrzeugkategorien ermittelt (Lensing 1997).

In TREMOD wurden die Daten mit einer Ausnahme übernommen: Um konsistent mit den Werten der FLU 1993 (Heusch-Boesefeldt 1996) zu bleiben, wurde die Fahrleistung der Busse auf Autobahnen um 25 % reduziert.

Für die Kreisstraßen in den neuen Bundesländern lagen 1995 keine Ergebnisse vor. Vereinfacht wurde daher die Gesamtfahrleistung auf Kreisstraßen in TREMOD abgeschätzt, indem die Ergebnisse der alten Bundesländer um 10 % erhöht wurden.

Tabelle 93: Fahrleistungen auf den freien Strecken der Autobahnen, Bundes- und Landesstraßen in Deutschland sowie den Kreisstraßen in den alten Bundesländern 1995

Mio. km	Autobahn	Bundesstr.	Landesstr.	Summe	Kreisstr. ABL
Kräder	1.543,5	2.153,7	2.314,8	6.012,0	1.170,4
Pkw	147.455,2	92.684,7	79.607,1	319.747,0	34.416,7
Busse	1.232,5	737,8	692,0	2.662,3	284,6
LKW<3,5t	5.352,7	3.282,2	2.986,7	11.621,6	1.064,4
Lkw ohne Anhänger	5.764,7	3.620,2	2.923,6	12.308,5	1.188,6
Lastzüge	17.739,2	4.202,4	2.048,6	23.990,2	701,7
gesamt	179.087,5	106.681,3	90.572,9	376.341,7	38.826,4

Quelle: (Lensing 1997)

Straßenverkehrszählung 2000

Die Straßenverkehrszählung 2000 verwendet die gleichen Abgrenzungen wie die Straßenverkehrszählung 1995. Zusätzlich lagen für die Kreisstraßen in Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen Ergebnisse vor.

In TREMOD wurden die Daten mit einer Ausnahme übernommen: Um konsistent mit den Werten der FLU 1993 (Heusch-Boesefeldt 1996) zu bleiben, wurde die Fahrleistung der Busse wie 1995 auf Autobahnen um 18,75 % reduziert.

Bei den Kreisstraßen wurden die Ergebnisse der alten Bundesländer mit einem Faktor von 1,15 auf Deutschland hochgerechnet. Gegenüber 1995 wird damit eine stärkere Fahrleistungszunahme in Ostdeutschland angenommen.

Tabelle 94: Fahrleistungen auf den freien Strecken der Autobahnen, Bundes- und Landesstraßen in Deutschland 2000

Mio. km / Jahr	Autobahn	Bundesstr.	Landesstr.	Summe	Kreisstr. ABL
Kräder	1.358,5	2.279,9	2.551,3	6.189,7	1.298,9
Pkw	163.010,2	93.112,8	82.559,6	338.682,6	35.851,7
Busse	1.138,7	731,1	767,9	2.637,7	347,6
LKW<3,5t	8.112,5	3.650,6	3.016,2	14.779,3	1.140,4
Lkw ohne Anhänger	6.274,4	3.471,4	2.735,6	12.481,4	1.177,9
Lastzüge	23.484,6	4.925,8	2.222,3	30.632,7	771,8
Gesamt	203.378,9	108.171,6	93.853,0	405.403,5	40.588,3

Quelle: (Lensing 2003)

Straßenverkehrszählung 2005

Die Straßenverkehrszählung 2005 verwendete die gleichen Abgrenzungen wie die Straßenverkehrszählung 2000.

In TREMOD wurden die Daten mit einer Ausnahme übernommen: Um konsistent mit den Werten der FLU 1993 (Heusch-Boesefeldt 1996) zu bleiben, wurde die Fahrleistung der Busse, wie 1995 und 2000, auf Autobahnen um 12,5 % reduziert.

Bei den Kreisstraßen wurden die Ergebnisse der alten Bundesländer mit einem Faktor von 1,15 wie im Jahr 2000 auf Deutschland hochgerechnet.

Tabelle 95: Fahrleistungen auf den freien Strecken der Autobahnen, Bundes- und Landesstraßen in Deutschland 2005

Mio. km / Jahr	Autobahn	Bundesstr.	Landesstr.	Summe	Kreisstr. ABL
Kräder	1.276,7	2.187,4	2.317,5	6.915,0	1.133,4
Pkw	170.667,4	92.855,9	72.098,8	366.393,0	30.770,9
Busse	1.048,0	665,3	686,7	2.560,3	291,3
LKW<3,5t	10.381,0	3.731,2	2.510,6	17.540,5	917,7
Lkw ohne Anhänger	6.112,8	2.947,1	1.974,1	11.842,6	808,6
Lastzüge	23.811,8	5.541,3	2.017,1	32.043,2	673,0
Gesamt	213.166,7	107.928,2	81.604,8	437.294,6	34.594,9

Quelle: (Kathmann, T. et al. 2007)

Straßenverkehrszählung 2010

In der Straßenverkehrszählung 2010 wurden nur noch die Autobahnen und Bundesstraßen vollständig erfasst. Diese Daten wurden direkt in TREMOD übernommen. Für die Busse gab es aufgrund der niedrigen Fahrleistung keinen Korrekturbedarf mehr.

Für die Landes- und Kreisstraßen lagen somit keine Fahrleistungsdaten mehr vor. In TREMOD wurden diese Werte für 2010 daher mit Hilfe der Fahrleistungserhebung 2014 durch lineare Interpolation abgeleitet.

Tabelle 96: Fahrleistungen auf den freien Strecken der Autobahnen und Bundesstraßen in Deutschland 2010

Mio. km / Jahr	Autobahn	Bundesstr.	Summe
Kräder	1.277,1	1.770,3	3.047,4
Pkw	171.901,3	92.752,1	264.653,4
Busse	856,0	590,1	1.446,1
LKW<3,5t	11.357,8	4.119,2	15.477,0
Lkw ohne Anhänger	5.997,0	2.834,9	8.831,9
Lastzüge	25.414,7	5.808,6	31.223,3
Gesamt	216.803,9	107.875,2	324.679,1

Quelle: (Lensing 2013)

Straßenverkehrszählung 2015

Die Ergebnisse der Straßenverkehrszählung 2015 lagen bis zum Redaktionsschluss als Entwurf vor. Sie beinhalten wie 2010 die Ergebnisse für Autobahnen und Bundesstraßen. Allerdings wurden Pkw und Lkw <=3,5t in einer Kategorie motorisierter Leichtverkehr „LVm“ zusammengefasst.

In TREMOD wurden die Daten übernommen. Die Aufteilung der LVm in Pkw und Lkw <=3,5t wurde anhand der Ergebnisse der Fahrleistungserhebung 2014 vorgenommen. Die Fahrleistungen der Kreis- und Gemeindestraßen (bzw. der „sonstigen Straßen“) wurde ebenfalls anhand der Fahrleistungserhebung 2014 abgeschätzt und ergänzt.

Tabelle 97: Fahrleistungen auf den freien Strecken der Autobahnen und Bundesstraßen in Deutschland 2015

Mio. km / Jahr	Autobahn	Bundesstr.	Summe
Kräder	1.316,0	1.244,7	2.560,7
LVm: Pkw und Lkw<3,5t	201.400,3	97.386,4	298.786,7
Busse	909,5	467,7	1.377,2
Lkw ohne Anhänger	6.452,4	2.895,8	9.348,2
Lastzüge	27.527,2	5.431,0	32.958,2
Gesamt	237.605,4	107.425,6	345.031,0

Quelle: (Mahmoudi / Frenken 2017)

Jahresauswertungen der Dauerzählstellen

Für die Autobahnen und Bundesstraßen werden jährlich die Messergebnisse der automatischen Dauerzählstellen, differenziert nach den Fahrzeuggruppen Leichtverkehr (LV) und Schwerverkehr (SV) veröffentlicht (letzte Veröffentlichung: (Fitschen / Nordmann 2018)). Diese Ergebnisse sind kompatibel mit den Straßenverkehrszählungen, sodass mit der Kombination beider Quellen eine vollständige Zeitreihe der Fahrleistungen auf Autobahnen und Bundesstraßen erstellt werden kann. In TREMOD wird dies umgesetzt, indem die Anteile der Kräder, Pkw und Lkw<=3,5t am Leichtverkehr sowie der Busse, Lkw ohne Anhänger und Lastzüge am Schwerverkehr zwischen den Stützjahren der Straßenverkehrszählungen linear interpoliert und daraus jährliche Fahrleistungen der sechs Fahrzeugkategorien berechnet werden.

Tabelle 98: Fahrleistungsentwicklung auf Autobahnen und Bundesstraßen an den automatischen Dauerzählstellen 1993 bis 2015

Jahr	Autobahn LV	Autobahn SV	Autobahn LV+SV	Bundesstraßen LV	Bundesstraßen SV	Bundesstraßen LV+SV
1993	150,5	21,7	172,2	94,7	7,7	102,4
1994	152,6	23,1	175,7	97,0	8,2	105,2
1995	154,6	24,5	179,1	98,1	8,6	106,7
1996	156,0	25,7	181,7	98,0	8,8	106,8
1997	159,7	27,4	187,1	97,9	9,0	106,9
1998	164,6	28,5	193,1	98,2	9,1	107,3
1999	169,1	30,4	199,5	98,9	9,1	108,0
2000	172,7	30,7	203,4	99,1	9,1	108,2
2001	174,4	31,2	205,6	98,4	8,9	107,3
2002	176,9	31,7	208,6	99,0	8,8	107,8
2003	179,4	32,1	211,5	99,6	8,8	108,4
2004	182,1	32,5	214,6	100,1	8,7	108,8
2005	182,4	30,9	213,3	98,8	9,2	107,9
2006	181,7	33,1	214,8	98,6	9,1	107,7
2007	183,9	34,9	218,8	99,6	9,1	108,7
2008	182,5	34,8	217,3	98,8	9,0	107,8
2009	185,6	30,8	216,4	99,3	8,9	108,2
2010	184,5	32,3	216,8	98,6	9,2	107,9
2011	189,9	33,3	223,2	100,2	9,5	109,7

Jahr	Autobahn LV	Autobahn SV	Autobahn LV+SV	Bundesstraßen LV	Bundesstraßen SV	Bundesstraßen LV+SV
2012	188,5	32,9	221,4	98,5	9,3	107,8
2013	191,5	33,5	225,0	97,4	9,1	106,5
2014	196,9	33,9	230,8	98,6	8,9	107,5
2015	202,7	34,9	237,6	98,6	8,8	107,4

LV: Leichtverkehr (mot. Zweiräder, Pkw, LNF); SV: Schwerverkehr (Busse, schwere Nutzfahrzeuge)

Quelle: BAST-Berichte „Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen“, aktuell: (Fitschen / Nordmann 2018)

Fahrleistungserhebungen 1993 und 2002

Die Fahrleistungserhebungen wurden von IVT im Auftrag der BAST durchgeführt. Wesentliches Element der Fahrleistungserhebungen sind umfangreiche Befragungen der Fahrzeugnutzer in Deutschland. Anhang der Ergebnisse der Halter-befragung wurde die Inländerfahrleistung für verschiedene Jahre abgeleitet, die nach einzelnen Fahrzeugkategorien, Größenklassen, Fahrzeugalter und anderen Kriterien differenziert.

Die Inlandsfahrleistung 2002 wurde von IVT ermittelt, indem Erhebungen zum grenzüberschreitenden Verkehr mit den Ergebnissen der Inländerfahrleistung verknüpft wurden. Eine Aufteilung der Fahrleistung nach Straßentypen wurde nicht vorgenommen. Während diese weiterführende Aufgabe für die Jahre 1990 und 1993 von Heusch-Boesefeldt im Rahmen der Fahrleistungsuntersuchung (Heusch-Boesefeldt 1996) durchgeführt wurde, gibt es für das Jahr 2002 keine derartige Analyse (IVT 2004a).

Tabelle 99: Inländerfahrleistung 1993 und 2002

Fahrzeuggruppe	Kfz-Bestand zur Jahresmitte (in 1000) 1993	Kfz-Bestand zur Jahresmitte (in 1000) 2002	Fahrleistung (in Mio. km) 1993	Fahrleistung (in Mio. km) 2002	Veränderung 1993/2002 Bestand	Veränderung 1993/2002 Fahrleistung
Krafträder	1.872	3.642	7.803	12.164	+94,6 %	+55,9 %
Pkw	38.653	44.673	548.445	598.485	+15,6 %	+9,1 %
Kraftomnibusse	88	85	3.958	4.219	-3,4 %	+6,6 %
Lastkraftwagen	1.988	2.632	49.285	60.177	+32,4 %	+22,1 %
Zugmaschinen	152	226	9.490	16.629	+48,7 %	+75,2 %
Sonst. Kfz.	569	687	6.957	7.588	+20,7 %	+9,1 %
Fz m Vers.kennz.	2.036	1.517	5.148	3.751	-25,5 %	-27,1 %
Insgesamt	45.358	53.461	631.086	703.013	+17,9 %	+11,4 %

Quelle: (IVT 1994), (IVT 2004b)

Tabelle 100: Inlandsfahrleistung 1993 und 2002 nach Fahrzeugarten

Fahrzeugarten	1993 (Mio. km)	2002 (Mio. km)	Veränderung
---------------	----------------	----------------	-------------

Fahrzeugarten	1993 (Mio. km)	2002(Mio. km)	Veränderung
Mofas Mopeds	3.888,0	3.751,0	-3,5 %
KR	7.803,0	12.159,9	55,8 %
Pkw	546.516,0	598.468,0	9,5 %
Kraftomnibusse	3.867,7	4.086,6	5,7 %
Personenverkehr insgesamt	562.074,7	618.465,5	10,0 %
Lkw, Zugmasch., sonst. Kfz	64.399,6	84.876,9	31,8 %
Alle Kfz	626.473,3	703.342,4	12,3%

Quelle: (IVT 1994), (IVT 2004a)

Tabelle 101: Inländer- und Inlandsfahrleistung nach Fahrzeugarten 2002

in Mio. km	Inländer	Inländer im Ausland	Ausländer im Inland	Inland
PV insgesamt	622.626,4	23.407,4	19.210,4	618.465,4
Pkw	598.484,9	22.297,0	18.166,1	594.354,0
Kraftrad	12.164,3	324,3	319,9	12.159,9
Wohnmobile	4.043,5	268,9	339,3	4.114,0
Bus	4.218,7	517,2	385,1	4.086,6
Kfz mit Vers.kennz.	3.751,0	0,0	0,0	3.751,0
GV insgesamt	80.351,1	3.651,5	8.177,3	84.876,9
Lkw ≤ 3,5 t zG	34.519,6	472,3	610,4	34.657,7
Lkw ≥ 3,5 t,Zugmasch.	42.287,0	3.179,3	7.566,9	46.674,6
Sonstige Kfz	3.544,5	0,0	0,0	3.544,5
Insgesamt	703.013,5	27.058,9	27.387,7	703.342,3

Quelle: (IVT 2004a)

In TREMOD wurden die Fahrleistungserhebungen 1993 und 2002 für die Ableitung von Fahrleistungsrelationen nach Fahrzeugmerkmalen verwendet. Für die Inlandsfahrleistung 1993 wurde direkt die FLU 1993 verwendet. In den bisherigen TREMOD-Versionen wurde die Inlandsfahrleistung 2002 berücksichtigt. Bei der in dieser Studie durchgeführten Aktualisierung wurden wie bisher die Fahrleistungen der motorisierten Zweiräder, der LNF, Busse und übrigen Kfz übernommen. Die Fahrleistungen der Lkw und Sattelzüge wurden neu berechnet.

Verkehr in Kilometern

Das KBA veröffentlicht seit 2013 die Fahrleistungen der in Deutschland zugelassenen Kraftfahrzeuge. Diese Werte beruhen empirisch auf Ablesungen des Tachostands der Fahrzeuge bei den Hauptuntersuchungen und einer Hochrechnungsmethodik, die u.a. Ergebnisse der

Fahrleistungserhebungen verwendet. (siehe (KBA 2018)) , Insbesondere die mittleren Jahresfahrleistungen eignen sich somit gut für die Hochrechnung der Inländerfahrleistungen. Ergebnisse dieser Erhebung sollen auch weiterhin jährlich veröffentlicht werden. In Verkehr in Zahlen sollen diese Werte zukünftig eine wichtige Grundlage sein.

Es ist daher sinnvoll, dass auch in TREMOD diese Daten soweit möglich verwendet werden. Da es sich hierbei um die Inländerfahrleistung handelt, kommt diese Datenquelle für die Fahrzeugkategorien in Frage, bei denen sich Inlandsfahrleistung und Inländerfahrleistung nicht sehr stark unterscheiden. Dies gilt für die Krafträder, Pkw, Lkw<=3,5t, Busse und sonstige Fahrzeuge.

Zur Datenaktualisierung wurden die in Tabelle 102 dargestellten Werte zugrunde gelegt. Diese wurden im August 2019 revidiert (siehe (KBA 2019a), (KBA 2019b)). Die aktualisierten Werte konnten im Rahmen der diesjährigen TREMOD-Aktualisierung jedoch nicht mehr berücksichtigt werden.

Tabelle 102: Mittlere Jahresfahrleistung der Fahrzeuge in Deutschland 2013 bis 2017 nach KBA-Daten (Stand November 2018)

Kilometer je Fahrzeug	2013	2014	2015	2016	2017
Krafträder	2.349	2'321	2.302	2.268	2.250
Personenkraftwagen	14.259	14.100	14.074	14.015	13.922
Lkw bis 3,5 Tonnen	19.008	19.199	19.388	19.393	19.371
Lkw 3,5 bis 6 Tonnen	19.839	19.127	18.914	18.393	17.866
Lkw über 6 Tonnen	41.063	38.815	39.289	37.833	37.286
Land-/forstwirtsch. Zugm.	511	446	415	389	363
Sonstige Zugmaschinen	3.498	3.663	3.686	3.783	3.856
Sattelzugmaschinen	102.832	102.066	100.899	98.809	96.915
Omnibusse	55.224	56.030	57.311	58.615	57.580
Sonstige Kraftfahrzeuge	10.792	10.388	9.812	9.868	9.189
Kraftfahrzeuge insgesamt	13.559	13.405	13.385	13.341	13.257

Quelle: (KBA 2018)

Verkehr in Zahlen

In „Verkehr in Zahlen“ (VIZ) (Radke 2018) werden die Inländerfahrleistung und der Kraftstoffverbrauch der deutschen Kraftfahrzeuge in der Zeitreihe dargestellt. Dabei werden folgende Fahrzeugkategorien unterschieden:

Mofas, Mokicks, Mopeds: Diese Kategorie kann gleichgesetzt werden mit der TREMOD-Kategorie “Kleinkrafträder” (KKR).

Krafträder: Diese Kategorie kann gleichgesetzt werden mit der gleichnamigen TREMOD- bzw. KBA-Kategorie.

Personenkraftwagen: Diese Kategorie kann gleichgesetzt werden mit der gleichnamigen TREMOD- bzw. KBA-Kategorie.

Kraftomnibusse: Entspricht der KBA- bzw. SVZ-Kategorie Busse.

Lastkraftwagen: Entspricht der gleichnamigen KBA-Kategorie.

Sattelzugmaschinen: Entspricht der gleichnamigen KBA-Kategorie.

Übrige Kraftfahrzeuge und gewöhnliche Zugmaschinen außerhalb der Landwirtschaft: Entspricht den gleichnamigen KBA-Kategorien

Unterschieden wurden bisher die Fahrzeuge mit Otto- und Dieselantrieb. Eine weitere Unterteilung, z.B. nach Größenklassen oder nach Solo- und Zugbetrieb bei Lkw wird nicht vorgenommen. Ziel des Fahrleistungs- und Verbrauchsmodells des DIW ist es, für jedes Jahr ein in sich konsistentes Gerüst der Fahrleistungen und des Energieverbrauchs zu erstellen.

Im Jahr 2018 wurde die Methodik der Berechnung für die Werte ab 2017 angepasst, um die neuen Erkenntnisse aus der Fahrleistungserhebung 2014, der KBA-Ergebnisse und weitere Quellen (z.B. Mautstatistik) zu berücksichtigen. Die Kennzahlen aus VIZ von 2014, die in Kapitel B.2 in Vergleichstabellen dargestellt werden, beruhen auf der bisherigen Methodik.

Fahrleistungsanalyse des DIW im Jahr 2005

Das DIW veröffentlichte im Jahr 2005 eine Dokumentation zur Weiterentwicklung der Fahrleistungsberechnung in „Verkehr in Zahlen“ (Kalinowska et al. 2005). Darin wurden auch die Ergebnisse der Fahrleistungserhebung 2002 berücksichtigt. Neben der Inländerfahrleistung wurde auch die Inlandsfahrleistung 1994 bis 2003 abgeleitet. In TREMOD wurde daraus die Zeitreihe der Inlandsfahrleistung der Pkw übernommen. Lediglich in den Jahren 1999 und 2000 wurden Änderungen vorgenommen, da die Fahrleistungsabnahme nach DIW nicht plausibel erscheint. Es wurde vielmehr angenommen, dass die zum Jahresanfang 2000 eingeführte Ökosteuern zu vorgezogenen Kraftstoffkäufen führte, so dass die damit erbrachte Fahrleistung von 4 Mrd. km nicht 1999 sondern erst im Jahr 2000 stattfand.

Mautstatistik

Für die Autobahnen und mautpflichtige Bundesstraßen werden Fahrtdaten differenziert nach den Fahrzeuggruppen Leichtverkehr (LV) und Schwerverkehr (SV) veröffentlicht (letzte Version: (Bundesamt für Güterverkehr 2018)).

Die Mautstatistik ist nur bedingt für die Fahrleistungsermittlung in TREMOD geeignet. Zum einen wird immer nur ein Teil des Lkw-Verkehrs erfasst (über 12 t oder 7,5 t), zum anderen unterscheidet sich die Berechnungsgrundlage für die Länge der Mautabschnitte von der Methodik der Straßenverkehrszählung. Es ist uns aber nicht bekannt, welche Unterschiede bestehen und wie sich diese auswirken. Hinzu kommt, dass sich die Erhebungsbedingungen der Mautstatistik durch Ausweitung des Streckennetzes und der mautpflichtigen Fahrzeuge häufig geändert haben, so dass die zeitliche Entwicklung der Fahrleistungen nur bedingt vergleichbar ist. Aus diesem Grund wird die Mautstatistik in TREMOD nicht verwendet und nur für Plausibilitätschecks herangezogen.

Tabelle 103: Fahrleistungsentwicklung der mautpflichtigen Fahrzeuge

Jahr	Fahrleistung gesamt (Mrd.km)	FL Inländer (Mrd. km)	Abgrenzungen
------	---------------------------------	--------------------------	--------------

Jahr	Fahrleistung gesamt (Mrd.km)	FL Inländer (Mrd. km)	Abgrenzungen
2005	24,0		Lkw ab einem zGG von 12 Tonnen auf den rund 12.800 km Bundesautobahnen sowie auf rund 270 km Bundesstraßen
2006	25,8		
2007	27,8	18	
2008	27,6	18	
2009	24,4	16	
2010	25,7	16,6	
2011	26,7	16,9	
2012	26,6	16,7	Erweiterung der autobahnähnliche Bundesstraßen um ca.1.100 km bis 2015
2013	27,7	10,3	
2014	28,0	11,0	
2015	29,7	11,9	Fahrzeuge ab einem zGG von 7,5 Tonnen sind mautpflichtig
2016	32,5	13,3	
2017	33,6	14,3	

Quelle:(Bundesamt für Güterverkehr 2018) und Vorjahre

B.2 Aufbereitung der Fahrleistungserhebung 2014 für TREMOD

Die Ergebnisse der Fahrleistungserhebung 2014, werden, sofern möglich und sinnvoll, in TREMOD übernommen. Einzelne Ergebnisse der Inlands- und Inländerfahrleistung weichen zum Teil voneinander ab. Ebenso gibt es Abweichungen zu anderen wichtigen Fahrleistungsdatenquellen. Dies wird im Detail in diesem Kapitel erläutert.

Für die Verwendung von Fahrleistungsdaten in TREMOD spielen folgende Kriterien eine wichtige Rolle:

- ▶ Fortschreibbarkeit mit regelmäßig durchgeführten Datenerhebungen.
- ▶ Vergleichbarkeit mit anderen relevanten Untersuchungen.
- ▶ Plausibilität der Entwicklung in der Zeitreihe ab 1993.

Aus diesen Gründen hat die Vergleichbarkeit der TREMOD-Daten mit den Straßenverkehrszählungen der BAST, mit der Fahrleistungsermittlung des KBA und nicht zuletzt mit der Fahrleistungs- und Verbrauchsrechnung in „Verkehr in Zahlen“ eine hohe Priorität.

Die Aufbereitung der Ergebnisse der Fahrleistungserhebung 2014 für TREMOD folgt daher folgendem Schema:

Inlandsfahrleistung

- ▶ Abgleich der Fahrzeugkategorien: Vergleich der Abgrenzungen der FLE 2014 mit der TREMOD-Abgrenzung und Zuordnung zu TREMOD-Kategorien, Vergleich mit weiteren Datenquellen.
- ▶ Abgleich der Straßentypen und Ortslagen: Vergleich der Abgrenzungen der FLE 2014 mit der TREMOD-Abgrenzung und Zuordnung zu TREMOD-Kategorien Vergleich mit weiteren Datenquellen.
- ▶ Abgleich mit den Ergebnissen der Inländer-fahrleistung und anderen Quellen: Identifizierung von Widersprüchen und Entwicklung von Lösungsvorschlägen; Darstellung der vorgeschlagenen Vorgehens.

Inländerfahrleistung

- ▶ Abgleich der Fahrzeugkategorien und ihrer Untermerkmale (z.B. mit oder ohne Anhänger/ Größenklasse usw.) mit den in TREMOD verwendeten Kategorien und den Kategorien der Inlandsfahrleistung; Abschätzung von Unsicherheiten in der Zuordnung.
- ▶ Abgleich der Fahrzeugkategorien und der Ergebnisse mit anderen Untersuchungen (KBA, VIZ, SVZ: Straßenverkehrszählungen der BAST, VE-BFS).
- ▶ Vergleich der Ergebnisse Inlands- und Inländer-fahrleistung je Fahrzeugkategorie.
- ▶ Analyse der Unterschiede in den verschiedenen Erhebungen, Identifizierung möglicher Ursachen und Lösungsvorschläge.
- ▶ Ableitung der für TREMOD benötigten spezifischen Fahrleistungskennzahlen nach Antrieb und Alter.

B.2.1 Übersicht: Inlands- und Inländerfahrleistung 2014

Inlandsfahrleistung

In der Fahrleistungserhebung 2002 wurde vor allem der grenzüberschreitende Verkehr untersucht, um die Inlandsfahrleistung aus der Inländerfahrleistung abzuleiten. Dagegen erfasst die Inlandsfahrleistung 2014 (Bäumer et al. 2016), wie zuletzt die Fahrleistungsuntersuchung 1993, das gesamte inländische Straßennetz. Die Ergebnisse liegen in folgender Differenzierung vor:

- ▶ Fahrzeugkategorien (Motorisierte Zweiräder, Pkw, Pkw mit Anhänger, LNF, sonstige Kfz, Busse, Lkw ohne Anhänger, Lkw mit Anhänger, Sattelzüge),
- ▶ Fahrzeugherkunft (Inland, Ausland),
- ▶ Straßentypen (Autobahn, sowie Bundes-, Landes-, Kreisstraßen, sonstige Straßen je für Außer- und Innerortsstraßen).

Insgesamt beträgt der Anteil der Pkw-Inlandsfahrleistung an der gesamten Inlandsfahrleistung mit 600 Mrd. Fzg-km mehr als 80% (siehe Tabelle 104). Ca. 16% decken die Lkw inkl. LNF ab,

und die restlichen 4% die Busse zusammen mit den motorisierten Zweirädern und den sonstigen Fahrzeugen. Innerhalb der Lkw-Kategorie wurden 52 Mrd. km von LNF, 39 Mrd. km von schweren Lkw mit und ohne Anhänger und 26 Mrd. Fzg-km von Sattelzügen zurückgelegt.

Tabelle 104: Ergebnisse der Inlandsfahrleistung 2014 in Mrd Fzg-km

Fahrzeug Kategorien	Beschreibung	Fzg-km (Mrd. km)	Anteil der Fzg Kategorien (%) an der gesamten FL	Fzg-km der Ausländer (Mrd km)
Mot. Zweiräder	Mot. Zweiräder	17,47	2,4 %	1,6
Personen-kraftwagen	Pkw ohne Anhänger	586,19	78,8 %	20,8
	Pkw mit Anhänger, auch Lkw < 3,5t zGG mit Anhänger	14,79	2,0 %	1,1
	Summe Pkw	600,98	80,8 %	22
Lkw	LNF Güterkraftfahrzeuge mit einem zGG von höchstens 3,5t ohne An-hänge + Wohnmobile	51,79	7,0 %	3
	Lkw ohne Anhänge Güterkraftfahr-zeuge mit einem zGG von mehr als 3,5t	22,38	3,0 %	2
	Lkw mit Anhänger (Lastzüge)	16,61	2,2 %	4,5
	Sattelkraftfahrzeuge	26,26	3,5 %	8,4
	Summe Güterverkehr	117,0	15,7 %	17,9
Bus	Busse (mit mehr als 9 Sitzplätzen)	4,6	0,6 %	0,2
Sons. Fzg	Sonstige Fahrzeuge	3,81	0,5 %	0,3
Summe		743,86	100 %	41,8

Quelle: (Bäumer et al. 2016)

Die Aufteilung der Inlandsfahrleistung nach Fahrzeugkategorien -die sogenannte „8+1 Klassifizierung“- enthält wegen der Erhebungstechnik eine gewisse Unsicherheit. Zur Fahrzeugklassifizierung kommen Videokameras und Detektoren zum Einsatz, die zwischen gewissen Fahrzeugen, und der Vielfalt der Modelle, nicht perfekt unterscheiden können z.B. sind Lkw<3,5t mit Anhänger mit den Pkw mit Anhänger zusammen erfasst. Darüber hinaus enthält die Kategorie „sonstige Fahrzeuge“ leichte sowie schwere Fahrzeuge.

Ausländische Kraftfahrzeuge

Aus der Inlandsfahrleistung ergibt sich für 2014 ein Totalwert der Fahrleistung ausländischer Kraftfahrzeuge auf dem deutschen Straßennetz von knapp 42 Mrd. Fzg-km (dies entspricht einem Anteil von 5,6%). Besonders hohe Anteile ausländischer Kraftfahrzeuge finden sich bei großen Lkw und vor allem bei Zugmaschinen (Bäumer et al. 2016).

Inländerfahrleistung

Die Daten der Inländerfahrleistung wurden durch eine Halterbefragung erhoben. Die Ergebnisse sind in Tabelle 105 dargestellt. Insgesamt beträgt der Anteil der Pkw an der gesamten Inländerfahrleistung ca. 85% mit 599 Mrd. Fzg-km. Die Lkw inkl. LNF decken ihrerseits 12% der Fahrleistung ab. Innerhalb dieser Kategorie wurden 44 Mrd. km von LNF, 20 Mrd. Fzg-km von Lkw und 19 Mrd. Fzg-km von Sattelzügen zurückgelegt.

Tabelle 105: Ergebnisse der Inländerfahrleistung 2014 in Mrd Fz-km

Kfz Kategorien	Beschreibung	Fzg-km(Mrd km)	Anteil der gesamten Fahrleistung (%)	Fzg-km im Aus-land (Mrd km)
Mot. Zweiräder	Krafträder	12,37	1,7%	1
	Kfz mit Versicherungskennz. (Mofas/Mopeds)	4,62	0,7%	0,1
	Summe	16,99	2,4%	1,1
Personen-kraftwagen	Personenkraftwagen	594,59	84,1%	
	Wohnmobile	4,12	0,6%	
	Summe	598,7	84,7%	17,8
Lkw	Lkw ≤ 3,5t zGG mit/ohne Anhänger	44,12	6,2%	1,4
	Lkw > 3,5 t zGG mit/ohne Anhänger	19,76	2,8%	0,4
	Sattelzugmaschinen	19,31	2,7%	1,3
	Sons. Zugmaschinen	0,5595	0,1%	0
	Summe	83,74	11,8%	3
Bus	Busse	3,96	0,6%	0,2
Sons. Fzg	Sonstige Fahrzeuge: Schutz- u. Rettungsfzg. Müll- u. Reinigungsfzg, Arbeitsmaschinen und Sonstige	3,63	0,5%	0,05
Summe		707,02	100	22,2

Quelle: (Bäumer et al. 2016)

Inländerfahrleistung im Ausland

Die Auslandsfahrleistungen wurden im Rahmen der Halterbefragung mittels einer Zusatzfrage zum Auslandseinsatz des Kraftfahrzeuges gewonnen. Über alle Fahrzeugkategorien werden knapp 22 Mrd km im Ausland gefahren. Der maximale Anteil der im Ausland gefahrenen Kilometer betrifft überwiegend die Krafträder und die Sattelzüge mit ca. 6%.

Standardfehler und Unsicherheiten in den Erhebungen

Für die Ergebnisse der Erhebungen wurden auch die Unsicherheiten ermittelt (siehe Tabelle 16).

Tabelle 106: Relativer Standardfehler für Inlands- und Inländerfahrleistung

Relativer Standardfehler

	Inländerfahrleistung	Inlandsfahrleistung
Mot. Zweiräder	3,2%	11%
Kfz mit Vers. Kennz,	3,9%	
Pkw	0,6%	10%
Pkw m. Anh		14%
Busse	1,1%	18%
LNF	0,8%	9%
Lkw o Anh.		8%
Lkw m. Anh		14%
SZ	0,6%	9%
Sonst. Zugmaschinen	6,9%	
Sonstige Kfz	3%	12%

Quelle

Die Inlandsfahrleistung inländischer Fahrzeuge passt in beiden Erhebungen 2014 und bei fast allen Fahrzeugkategorien weitestgehend gut zusammen - außer für die Fahrzeugkategorie der Lkws > 3,5 t zGM. Möglicherweise ist diese Diskrepanz durch die Erfassungstechnik bei der Inlandsfahrleistungserhebung zu erklären, welche auf Kameras und Sensoren beruht. Dementsprechend werden einzelne Fahrzeugkategorien mit höherer Unsicherheit erfasst, z.B. landwirtschaftliche Zugmaschinen können möglicherweise als Lkw erfasst werden (Bäumer et al. 2016).

B.2.2 Ableitung der Inlandsfahrleistung 2014 nach Straßentypen in TREMOD

In den folgenden Abschnitten wird die Ableitung der Inlandsfahrleistungen für jede Fahrzeugkategorie beschrieben. Es werden folgende Datenquellen verwendet:

- ▶ VZ (Verkehrszählung): Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung
- ▶ HB (Halterbefragung): Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung
- ▶ KBA: Ermittlung der mittleren jährlichen Fahrzeugfahrleistung (KBA 2018).
- ▶ VIZ: Inländerfahrleistung nach „Verkehr in Zahlen 2018/2019 (alte Methodik)

Für die Fahrleistung nach Straßentypen werden zusätzlich die folgenden Quellen verwendet:

- ▶ SVZ: Straßenverkehrszählungen der BAST
- ▶ VE-BFS: Verkehr auf Bundesfernstraßen

In der neuen Ausgabe von VIZ wurde die Methodik der Fahrleistungsrechnung mit neuen Daten und Ansätze ab 2017 aktualisiert. Dabei werden für einzelne Fahrzeugkategorien die durchschnittlichen Fahrleistungen entsprechend der KBA Fahrleistungsdaten (KBA 2018) übernommen. Die hier dargestellten Werte für 2014 wurden nicht aktualisiert und entsprechen daher der bisherigen Methodik.

In Anbetracht der Unterschiede zwischen den Ergebnissen der VZ zu anderen Erhebungen wird eine Methode entwickelt, die sich an den vorhandenen regelmäßigen Zählungen der BAST (SVZ und VE-BFS) orientiert und die Erkenntnisse der VZ sinnvoll ergänzt. Denn die BAST-Zählungen werden voraussichtlich auch zukünftig die wichtigsten jährlich bzw. fünfjährlich verfügbaren Datenquellen für die Aktualisierung der Fahrleistungen in TREMOD sein. Es wird folgendes Vorgehen gewählt:

- ▶ Übernahme der durchschnittlichen Fahrleistung nach (KBA 2018) für Krafträder, Pkw, sonstige Kfz Busse und LNF.
- ▶ Ermittlung der Gesamtfahrleistungen durch Multiplikation des Bestands zur Jahresmitte mit der mittleren Fahrleistung.
- ▶ Ermittlung des Saldos Inländer- zu Inlandsfahrleistung für jede dieser Fahrzeugkategorien.
- ▶ Abschätzung der Gesamtfahrleistung der Lkw und Sattelzüge aus der SVZ und VZ; Herstellung einer Konsistenz zwischen beiden Untersuchungen.
- ▶ Aufteilung der Gesamtfahrleistung auf Basis der SVZ für Autobahnen und Bundesstraßen und auf Basis der VZ für die übrigen Straßentypen.

Das Endergebnis der Ableitung der Fahrleistung entsprechend der TREMOD-Systematik gegenüber der VZ 2014 ist in Tabelle 107 angegeben. Darüber hinaus ist diese Fahrleistung nach Straßentyp in Tabelle 108 dargestellt. Die Methodik zur Ableitung der Fahrleistungskennzahlen ist in den folgenden Unterkapiteln detailliert dargestellt.

Tabelle 107: Abgeleitete Fahrleistung für TREMOD

	VZ 2014	FL 2014 (TREMOD)	Quelle
KKR	4,7	4,7	ViZ 2018/2019
KR	12,8	9,5	KBA mittl.FL*Bestand zur Jahresmitte
Pkw	601	622,2	KBA mittl.FL*Bestand zur Jahresmitte
Übrige leichte Kfz	1,3	0,9	KBA mittl.FL*Bestand zur Jahresmitte
Busse	4,6	4,2	KBA mittl.FL*Bestand zur Jahresmitte
LNF	51,8	42,5	KBA mittl.FL*Bestand zur Jahresmitte + Saldo Inländer/Ausländer nach VZ und HB
Lkw ohne Anhänger	22,4	17,1	SVZ 2015/VZ 2014

	VZ 2014	FL 2014 (TREMOD)	Quelle
Übrige schwere Kfz	2,5	1,9	KBA mittl.FL*Bestand zur Jahresmitte
Lkw mit Anhänger	16,6	15,3	SVZ 2015/VZ 2014
Sattelzüge	26,3	26,3	VZ 2014
Summe	739,2	744,5	

Quelle: wie angegeben und eigene Berechnungen

Tabelle 108: Abgeleitete Fahrleistung nach Straßentypen für TREMOD in 2014

FL in Mrd Km	BAB	B	L	K	G	IO	Summe	Quelle
KR+KKR	1,3	1,3	2,6	1,5	1,0	6,5	14,2	SVZ 2015/KBA/Annahme ifeu
Pkw + übrige leichte Kfz	183,3	93,0	79,3	42,1	57,1	168,3	623,1	SVZ 2015/KBA/VZ 2014
Busse	0,9	0,5	0,6	0,3	0,7	1,2	4,2	SVZ 2015/KBA
LNF	12,3	4,2	5,6	3,2	4,1	13,1	42,5	SVZ 2015/KBA/VZ 2014
Lkw o. Anhänger + übrige schwere Kfz	6,3	2,9	1,7	0,9	2,0	5,2	19,0	SVZ 2015/KBA
Lkw mit Anhänger	10,1	1,9	0,5	0,4	0,7	1,8	15,3	SVZ 2015/KBA/VZ (Anteil Sz an SV)
Sattelzüge	16,7	3,7	1,4	0,7	1,7	2,1	26,3	SVZ 2015/KBA/VZ (Anteil Sz an SV)
Summe	230,8	107,4	91,6	49,2	67,3	198,2	744,5	

Quelle: wie angegeben und eigene Berechnungen

Krafträder

Die Fahrleistung der Krafträder aus der Fahrleistungserhebung 2014 stimmt gut mit der von VIZ überein. Dagegen liegen die KBA-Ergebnisse deutlich niedriger.

Tabelle 109: Vergleich der Krafträder-Fahrleistung nach Datenquellen

Quelle	Inlandsfahrleistung (Mrd km) VZ	Inländerfahrleistung (Mrd km) HB	Inländerfahrleistung (Mrd km) KBA	Inländerfahrleistung (Mrd km) VIZ
Krafträder	17,47	12,37	9,5	12,6
Kfz mit Versicherungskennzeichen (Mofas/Mopeds)		4,62	nf	4,7
Summe		16,99	nf	17,3

Quelle: wie angegeben

Ableitung der Inlandsfahrleistung für TREMOD

Krafträder

Die Fahrleistung der Krafträder wurde bisher aus VIZ übernommen. Da sich das neue Berechnungsverfahren von VIZ an die mittleren Fahrleistungen nach KBA anlehnt, werden für die Krafträder die KBA-Fahrleistungen in TREMOD übernommen (mittlere Fahrleistung multipliziert mit dem jahres-mittleren Bestand; 2014: 9.5 Mrd. km). Für die Kfz mit Versicherungskennzeichen (Mofas/Mopeds) werden die Daten von VIZ wie bisher übernommen da keine Daten aus Tachostandsablesungen seitens des KBA vorliegen (2014: 4,7 Mrd. km). Inländer- und Inlandsfahrleistung werden gleich angenommen. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die KBA-Daten für die Fortschreibung auch zukünftig verfügbar sein werden

Die Fahrleistungen der Krafträder in TREMOD sind damit deutlich niedriger als in der Fahrleistungserhebung 2014 ermittelt.

Die Unterteilung der Fahrleistung auf die Straßentypen wird wie folgt vorgenommen: Die Fahrleistungen der Autobahnen und Bundesstraßen werden aus SVZ 2015 übernommen und auf das Jahr 2014 rückgerechnet. Für die anderen Straßentypen wurde als Referenz die VZ 2014 übernommen und auf die vorgegeben Gesamtfahrleistung abgeglichen. Der Fahrleistungsanteil der KKR an der Gesamtfahrleistung der motorisierten Zweiräder wurde je Straßentyp aus der FLU 1993 und ifeu Annahmen abgeleitet (Anteile 2014: B:10%; L:20%; K:20%; G:25%, IO:54%). Die Daten zwischen 2010 und 2015 sind linear interpoliert.

Tabelle 110: Fahrleistung der Krafträder nach Straßentyp in 2014

Mrd km	BAB	B	L	K	G	IO
KKR	0	0,1	0,5	0,3	0,3	3,5
KR	1,3	1,2	2,0	1,2	0,8	3,0

Quelle: SVZ 2015/ KBA

Personenkraftwagen

Die Fahrleistung der Pkw liegt in den verschiedenen Erhebungen nahe beieinander. Der größte Unterschied ergibt sich zwischen der Halterbefragung (HB) und Verkehr in Zahlen (VIZ),

Tabelle 111: Vergleich der Pkw Fahrleistung nach Datenquellen

Quelle	Inlandsfahrleistung (Mrd km) VZ	Inlandsfahrleistung (Mrd km) HB	Inländerfahrleistung (Mrd km) KBA	Inländerfahrleistung (Mrd km) VIZ
Pkw	586,2	594,6	611,5	627,2
Pkw und Lkw < 3,5t zGG mit Anhänger	14,8	-	-	-
Summe	601,0	594,6	611,5	627,2

Es ist zu beachten, dass sich die Abgrenzung der Fahrzeugmerkmale in den verschiedenen Untersuchungen unterscheidet. So sind Pkw-ähnliche Fahrzeuge unterschiedlich erfasst. In der VZ werden die Fahrleistungen der Pkw und der Pkw mit Anhänger unterschieden. Darin können jedoch auch Lkw<3,5 t zGG enthalten sein. Diese Abweichungen liegen an der Erfassungstechnik.

Auf der anderen Seite werden Wohnmobile in der VZ als LNF erfasst. In Verkehr in Zahlen (VIZ) 2017/2018 sind M1 Fahrzeuge inkl. Fahrzeuge mit besonderer Zweckbestimmung z.B. Wohnmobile und Krankenwagen in den Pkw enthalten. In der HB sind Wohnmobile getrennt betrachtet. Sie legten im Jahr 2014 entsprechend der VZ sowie HB 4 Mrd. Kilometer zurück.

Ableitung der Inlandsfahrleistung für TREMOD

Die Fahrleistung der Pkw wurde bisher in TREMOD auf die Zeitreihe von „Verkehr in Zahlen“ (VIZ) abgestimmt. Da sich VIZ ab 2017 an den KBA-Daten anlehnt, ist es sinnvoll, dass TREMOD diesem Vorgehen folgt. Die KBA-Daten werden daher ab 2014 auch in TREMOD übernommen. Es wird angenommen, dass die Inländerfahrleistung der Inlandsfahrleistung entspricht (in der VZ 2014 gleichen sich die Inländerfahrleistung im Ausland und die Fahrleistung der Ausländer in Deutschland in etwa aus). Die Fahrleistung der Pkw in TREMOD liegt damit etwas höher als in der VZ und in der HB mit 622,2 Mrd Km.

Die Umlegung von Fahrzeuganteilen auf die verschiedenen Straßentypen erfolgt wie folgt: die Fahrleistung auf Autobahnen und Bundesstraßen werden aus der SVZ 2015 übernommen und in der Zeitreihe interpoliert. Die Aufteilung der Fahrleistung auf die anderen Straßentypen entspricht der VZ 2014.

Tabelle 112: Pkw Fahrleistung nach Straßentyp in 2014

Mrd Km	BAB	B	L	K	G	IO
Pkw, übrige	182	93	79	42	57	168

Quelle: SVZ 2015/KBA/VZ 2014

Kraftomnibusse

Die Fahrleistung der deutschen Busse nach der HB und nach KBA-Daten zeigt eine hohe Übereinstimmung. Die Inlandsfahrleistung weist 0,6 Mrd km zusätzliche Fahrleistung aus, die teilweise an der Einbeziehung ausländischer Busse in der VZ liegen soll. In VIZ lag die Fahrleistung bisher bei 3,3 Mrd km (siehe Tabelle 113).

Tabelle 113: Vergleich der Busfahrleistung nach Datenquellen

	Inlandsfahrleistung (Mrd km) VZ	Inlandsfahrleistung (Mrd km) HB	Inländerfahrleistung (Mrd km) KBA	Inländerfahrleistung (Mrd km) VIZ
Standardlinienbus		2,2		
Überlandlinienbus		0,6		
Lbus		2,8		
k.A		0,08		
Reisebus		0,85		
Sonstiger Bus		0,2		
Rbus		1,1		
Insgesamt	4,6	4,0	4,2	3,3

Quelle: wie angegeben

Ableitung der Inlandsfahrleistung für TREMOD

Die Fahrleistung der Busse wird, analog zu Pkw und motorisierten Zweirädern, aus den KBA-Daten abgeleitet. Inländer- und Inlandsfahrleistung werden als gleich angenommen.

In TREMOD wird zwischen Fernlinienbus, Nahlinienbus und sonstigem Reisebus unterschieden (siehe Kapitel A.3). Die Aufteilung auf die Straßentypen (siehe Tabelle 114) folgt der gleichen Methodik wie für Pkw: die Fahrleistung auf Autobahnen und Bundesstraßen kommt aus der SVZ 2015 (mit Rückrechnung nach 2014 durch Interpolation), die Anteile der übrigen Straßentypen aus die VZ 2014, abgeglichen auf die Fahrleistungseckwerte. Die Aufteilung der Eckwerte je Straßenkategorie auf die drei Buskategorien erfolgt auf Basis plausibler Annahmen, unter Berücksichtigung der vorgegebenen Gesamtfahrleistung je Bustyp (siehe Kapitel A.3).

Tabelle 114: Fahrleistung der Busse nach Straßentyp (2014)

Mrd Km	BAB	B	L	K	G	IO	Gesamt
Fernlinienbus	0,09	0,01	0,01	0,00	0,00	0,04	0,15
Nahlinienbus	0,18	0,30	0,38	0,20	0,55	0,90	2,52
Sonstiger Reisebus	0,62	0,18	0,18	0,06	0,17	0,30	1,52
Busse	0,89	0,49	0,58	0,27	0,72	1,24	4,18

Quelle: SVZ 2015, KBA, VZ, DESTATIS, eigene Berechnungen

Güterverkehr

Überblick Güterverkehrsfahrleistung 2014

Die gesamte Inlandsfahrleistung des Güterverkehrs (LNF Solo-Lkw, Lastzüge und Sattelzüge) in der VZ beträgt 117 Mrd Fzg-km. Dies entspricht ca. 16% der gesamten Fahrleistung in Deutschland.

In der HB liegt die Gesamtfahrleistung bei 83,7 Mrd. km und damit deutlich niedriger als in der VZ. Der prozentuale Anteil des Güterverkehrs an der gesamten Fahrleistung aus der HB ist deshalb mit ca. 12% niedriger als in der VZ. Dieser Unterschied weist darauf hin, dass ausländische Lkw einen höheren Anteil an der Fahrleistung im Güterverkehr haben als inländische Lkw im Ausland.

Tabelle 115: Anteil der angegebenen Fahrzeugkategorien an der Güterverkehrsfahrleistung

	VZ	VZ – Inlandsfahrleistung der Inländer	VZ - Inlandsfahrleistung der Ausländer
LNF	44%	49%	17%
Lkw	33%	33%	37%
SZ	22%	18%	47%

Wie aus Tabelle 115 zu entnehmen ist, legen LNF gemäß VZ 44% der Güterfahrleistung zurück, Lkws zwischen 33% und Sattelzüge ca. 22%.

Die Verteilung der Inlandsfahrleistung der verschiedenen Güterfahrzeugkategorien nach Inländer und Ausländer weist darauf hin, dass die Sattelzüge einen großen Anteil an der Fahrleistung der ausländischen Lkw haben (fast die Hälfte), und dass relativ wenig Kilometer von ausländischen LNF in Deutschland zurückgelegt sind.

Leichte Nutzfahrzeuge

Wie in Tabelle 116 dargestellt, unterscheiden sich die Fahrleistungen je nach Datenquelle.

Tabelle 116: Vergleich der LNF Fahrleistung nach Datenquellen

Quelle	Inlandsfahrleistung (Mrd km) VZ	Inlandsfahrleistung (Mrd km) HB	Inländerfahrleistung (Mrd km) KBA	Inländerfahrleistung (Mrd km) VIZ
LNF	51,8*	48,2	40,4	+ Lkw 66,3

*inkl. Wohnmobile

Zu diesen Unterschieden gibt es verschiedene Erklärungsansätze: Die Wohnmobile werden in den Datenquellen verschieden behandelt. In der VZ sind sie den LNF zugeordnet. Das Ergebnis der HB enthält die Wohnmobile separat (LNF 44 Mrd. km, Wohnmobile 4 Mrd. Fzg-km). Innerhalb der KBA-Daten sind die Wohnmobile nicht separat ausgegeben und in den Pkw enthalten. In VIZ werden die Fahrleistungen der LNF nicht separat ausgewiesen, sondern sind in den Lkw mit enthalten.

Zudem sind die ausländischen LNF in der Inländer-fahrleistung nicht enthalten. Wenn nur die Inlandsfahrleistung der Inländer betrachtet ist, wie in Tabelle 117 zu entnehmen, stimmen beide Quellen der Fahrleistungserhebung recht gut überein. Die Abweichung mit VIZ und KBA-Daten bleibt aber zum Teil unerklärt.

Tabelle 117: Inlandsfahrleistung deutscher LNF

	Inlandsfahrleistung der Inländer VZ	Inlandsfahrleistung der Inländer HB
LNF + Wohnmobile	48,8	46,8*

*Wohnmobile ca. 4 Mrd. km

Ableitung der Inlandsfahrleistung für TREMOD

Die Fahrleistung der LNF wird wie folgt abgeleitet: das Produkt der mittleren Fahrleistung je Fahrzeug entsprechend der KBA-Daten und des Bestands ergibt die Inländerfahrleistung. Die gewünschte Inlandsfahrleistung der leichten Nutzfahrzeuge setzt sich aus der Inländerfahrleistung (KBA Bestand * durchschnittliche FL = 41,052 Mrd. km in 2014) minus die Inländerfahrleistung im Ausland (aus der HB) +die Inlandsfahrleistung der Ausländer (aus der VZ) zusammen. Aus der Formel entsteht für die Inlandsfahrleistung der LNF 2014 einen Zuschlag von 3,5% zur Inländerfahrleistung ($41,052 \cdot 103,5\% = 42,5$ Mrd. km) Die Fahrleistungen der Lkw <3,5t sind damit in TREMOD 2014 mit 42,5 Mrd km um ca. 20% niedriger als in der VZ 2014.

Die Unterteilung der Fahrleistung nach Straßentypen entspricht der Methodik bei Pkw: Die Fahrleistung auf BAB und B werden aus der SVZ 2015 übernommen; für die anderen Straßentypen werden die Ergebnisse der VZ 2014 herangezogen und die Wachstumsrate 2014/2015 aus KBA-Daten abgeleitet. Das Ergebnis ist aus Tabelle 118 zu entnehmen.

Tabelle 118: Fahrleistung der LNF nach Straßentyp (2014)

Mrd Km	BAB	B	L	K	G	IO
LNF	12,3	4,2	5,6	3,2	4,1	13,1

Quelle: SVZ 2015 /KBA/VZ 2014

Schwere Nutzfahrzeuge

Die Fahrleistung der Lkw (ohne und mit Anhänger) sind je nach Datenquelle sehr unterschiedlich: Wurden in der VZ für die Inlandsfahrleistung 39 Mrd Fzg-km erfasst, ergeben sich für die Inländerfahrleistung nur 19,76 Mrd Fzg-km aus der HB und rund 16 Mrd Fzg-km nach KBA-Daten und VIZ vgl. Tabelle 119.

Tabelle 119: Fahrleistung der Lkw nach Datenquellen

Quelle	Inlandsfahrleistung (Mrd km) VZ	Inlandsfahrleistung (Mrd km) HB	Inländerfahrleistung (Mrd km) KBA	Inländerfahrleistung (Mrd km) VIZ
Lkw mit Anhänger	16,6			
Lkw ohne Anhänger	22,4			
Summe	39	19,76	16,4	16,9

Um die Zahlen zu vergleichen wird die Inlandsfahrleistung der deutschen Lkw aus der VZ mit der Inländerfahrleistung auf deutschen Straßen aus der HB verglichen (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Tabelle 120: Inlandsfahrleistung deutscher Lkw

	Inlandsfahrleistung der Inländer VZ	Inlandsfahrleistung der Inländer HB
Lkw mit Anhänger	12,1	
Lkw ohne Anhänger	20,35	
Summe	32,4	19,4

Die Differenz lässt sich weder durch den Betrieb ausländischer Lkws in Deutschland noch durch die Stichprobe und Standardfehler erklären. Auch verglichen mit VIZ und KBA-Daten, ist das Ergebnis der VZ deutlich höher.

Die Inlandsfahrleistung der Sattelzüge (SZ) erreicht 26 Mrd Fzg-km während die Ergebnisse der Inländerfahrleistung ca. 20 Mrd Fzg-km betragen. Das Ergebnis von VIZ ist niedriger mit fast 17 Mrd Fzg-km.

Tabelle 121: Fahrleistung der SZ nach Datenquellen

Quelle	Inlandsfahrleistung (Mrd km) VZ	Inländerfahrleistung (Mrd km) HB	Inländerfahrleistung (Mrd km) KBA	Inländerfahrleistung (Mrd km) VIZ
SZ	26,3	19,9	18,4	16,9

Wie aus Tabelle 122 zu entnehmen ist, liefern die VZ und die HB ähnliche Zahlen für die Inlandsfahrleistung der deutschen SZ. Die rund 8 Mrd zusätzlichen Kilometer der Inlandsfahrleistung werden von ausländischen SZ erbracht. Dementsprechend beträgt die Fahrleistung der ausländischen Lkw 32% der SZ Fahrleistung.

Tabelle 122: Inlandsfahrleistung deutscher SZ

	Inlandsfahrleistung der Inländer VZ	Inlandsfahrleistung der Inländer HB
SZ	17,9	18,6

Ableitung der Inlandsfahrleistung für TREMOD

In der Fahrleistungserhebung 2014 wurden Inlandsfahrleistungen ermittelt, die deutlich über den Zählergebnissen der Straßenverkehrszählungen aber auch der Inländerfahrleistung 2014 liegen. Die Fahrleistung der Lkw in TREMOD wurde daher für 2014 nach unten korrigiert. Zunächst wurden für Autobahnen und Bundesstraßen die Fahrleistungen der SVZ 2015 für 2014 rückgerechnet. Die Gesamtfahrleistung wurde berechnet, indem die Fahrleistungsdifferenz auf Autobahnen und Bundesstraßen, die zwischen den Straßenverkehrszählungen und der Fahrleistungserhebung 2014 besteht, auf die übrigen Straßentypen übertragen wurde. Die Gesamtfahrleistung ergibt sich dann als Summe der Fahrleistungen über alle Straßentypen. Mit 17,1 Mrd. km sind die Fahrleistungen der Lkw >3,5t damit in TREMOD 2014 um 23% bzw. 5,3 Mrd. km niedriger als in der VZ 2014.

Für die Lkw mit Anhänger wurde das Verfahren ebenfalls angewendet: Die Fahrleistung der Lastzüge (Lkw ohne Anhänger und Sattelzüge) ist in der VZ auf Autobahnen etwas höher, auf Bundesstraßen etwas niedriger als in der SVZ 2015. Um die Fahrleistungen der Lkw ohne Anhänger zu korrigieren, wurde die Fahrleistung der Lastzüge aus der SVZ in Lkw mit Anhänger und Sattelzüge unterteilt unter der Annahme, dass die Sattelzüge in der VZ direkt in TREMOD übernommen werden können. Damit lässt sich die Fahrleistung der Lkw ohne Anhänger aus der SVZ für Autobahnen und Bundesstraßen als Differenz bestimmen. Die angepasste Fahrleistung der Lkw ohne Anhänger liegt dann um 8% bzw. 1,3 Mrd. km niedriger als in der VZ. Die Ergebnisse der Fahrleistungserhebung für die Sattelzüge fügen sich gut in das gesamte Fahrleistungsgerüst für den Güterverkehr ein. Sie werden daher mit 26,3 Mrd km direkt aus der VZ übernommen.

Die entsprechende Aufteilung der Fahrleistungsanteile auf Straßentypen ist aus Tabelle 123 zu entnehmen.

Tabelle 123: Fahrleistung des Schwerverkehrs nach Straßentyp (Interpolation 2014)

Mrd Km	BAB	B	L	K	G	IO	Quelle
Lkw + Ü. schwere Fahrzeuge	6,3	2,9	1,7	0,9	2,0	5,2	SVZ 2015/KBA
LZ	10,1	1,9	0,5	0,4	0,7	1,8	SVZ 2015/KBA/VZ (Anteil LZ an SV)
SZ	16,7	3,7	1,4	0,7	1,7	2,1	SVZ 2015/KBA/VZ (Anteil LZ an SV)

B.2.3 Fahrleistung nach Fahrzeugalter

In TREMOD wird die Fahrleistung der verschiedenen Fahrzeuge nach Fahrzeugalter sowie nach Antriebsart gewichtet. Grund dafür ist, dass alte Fahrzeuge weniger als neuer Fahrzeuge fahren. Da die Schadstoffemissionen sich je nach Alter der Fahrzeuge (und entsprechenden Euronormen) stark unterscheiden, spielt diese Gewichtung eine wichtige Rolle.

Die HB liefert Daten für folgende Altersstufen: jahresfein bis 12 Jahre, aggregiert von 12 bis unter 15 Jahre, von 15 bis unter 20 Jahre sowie 20 Jahre und älter. Im Unterschied dazu wird die mittlere Jahresfahrleistung in TREMOD grundsätzlich für jeden Altersjahrgang bis 30 Jahre abgebildet. Hierzu werden die Ergebnisse der HB als Grundlage genommen und ggf. für die Modellierung angepasst d.h. interpoliert und/oder geglättet, da die Ergebnisse der HB wegen teils geringer Fallzahlen in einer Altersklasse oft Sprünge aufweist. Dies wird in jedem Einzelfall

entschieden. Die beschriebene Alterskategorisierung der HB gilt für alle Fahrzeugkategorien, dementsprechend ist das grundsätzliche Verfahren zur Übernahme der Werte in TREMOD für alle Fahrzeugkategorien gleich.

Krafträder

Für die Fahrzeuge mit Versicherungskennzeichen liegen aus der HB keine Altersverteilungen vor. Die jährliche mittlere Fahrleistung der Kleinkrafträder (bis 50 cm³) bezieht sich auf die Altersverteilung der Leichtkrafträder (50-125 cm³). Diese könnte den Kfz mit Versicherungskennzeichen zugeordnet werden. Da sie jedoch große Schwankungen je nach Alter aufweist und damit nicht plausibel erscheint, wurde dieselbe Altersverteilung wie für die Krafträder übernommen.

Personenkraftwagen

Eine Differenzierung der Fahrleistungen nach Antriebsart zeigt, dass die Diesel- und Erdgasfahrzeuge zweimal mehr, die Flüssiggas- und Hybridfahrzeuge ca. 50% mehr fahren als die Benzinfahrzeuge im Neuzustand, während die Fahrleistungen der Elektrofahrzeuge niedriger ausgewiesen wird. Generell legen alte Fahrzeuge weniger Kilometer als die neuen Pkws zurück.

Bei einigen alternativ angetriebenen Fahrzeugen fehlt wegen geringer Fallzahlen eine repräsentative Stichprobe für bestimmte Jahrgänge, deswegen ist die mittlere Fahrleistung des letzten verfügbaren Jahrgangs konstant für benachbarte Jahrgänge z.B. für Erdgas ab 16 Jahre, für BEV zwischen 4 und 11 und ab 14 Jahre, und Hybridfahrzeuge über 10 Jahre.

In Anbetracht der starken und schwer nachvollziehbaren Variationen aufgrund des geringen Erhebungsumfangs wurde entschieden, die Gewichtung der Diesel- und Benzin-Fahrzeuge als Grundlage für die alternativen Antriebe zu übernehmen:

- ▶ Diesel-Pkw für Erdgasfahrzeuge, da Erdgasfahrzeuge zumindest in den ersten Jahren einen ähnlichen Verlauf aufweisen wie die Diesel-Pkw.
- ▶ Benzin-Pkw für Flüssiggas und Elektrofahrzeuge, da beide eher einen flachen Verlauf aufweisen, ähnlich den Benzin-Pkw

Aus Tabelle 124 lässt sich der schnelle Rückgang der Fahrleistung der Diesel-Pkw nach Alter erkennen. Im Vergleich liegt die Fahrleistung der über 30 Jahre alten Benzin-Pkw bei 57 % der Neufahrzeuge, während sehr alte Diesel-Fahrzeuge nur 27% der Fahrleistung neuer Fahrzeuge zurücklegen.

Kraftomnibusse

In TREMOD werden Busse nach Fernlinienbussen, Nahlinienbussen und sonstigen Reisebussen unterteilt. Die Kennzahlen werden wie folgt aus der HB übernommen: Die Fernlinienbusse werden wie Reisebusse abgebildet. Die Kategorien „keine Angabe“ und „sonstige Busse“ werden in TREMOD dem sonstigen Reisebus zugeordnet.

LNF

Die altersabhängige Fahrleistungsrelation der Fahrzeugkategorie LNF (Lkw<3,5 t zGG) wird entsprechend der Methode für Pkw ermittelt. Die fehlenden jahresfeinen Daten wurden fortgeschrieben (zwischen 13 und 14, 16 und 19 sowie ab 20 Jahre alt). Hieraus ergibt sich die FL-Fahrzeugalter Relation in Tabelle 124. Die höchste jährliche Fahrleistung von 29.000 Fzg-km wird von neuen Fahrzeugen erreicht, während die mittlere Jahresfahrleistung mit dem Alter der Fahrzeuge kontinuierlich abnimmt.

Schwere Nutzfahrzeuge

Die höchste jährliche mittlere Fahrleistung der deutschen Lkws beträgt 60.000 Fzg-km für die neuen Fahrzeuge. Diese nimmt ständig ab bis auf weniger als 10.000 km für die ältesten Fahrzeuge ab ca. 21 Jahre. Die in Tabelle 124 gezeigte Fahrleistungsänderung gilt für Lkws aller Größenklassen.

Die jährliche mittlere Fahrleistung der neuen SZ beträgt laut den Ergebnissen der Inländerfahrleistung 107.000 Fzg-km. Sie geht mit den Jahren stark zurück sodass 8 Jahre alte Fahrzeuge weniger als die Hälfte der Fahrleistung neuer Fahrzeuge zurücklegen, wie in Tabelle 124 dargestellt.

Tabelle 124: Jährliche mittlere Fahrleistung der Fahrzeugkategorien nach Fahrzeugalter in Relation zu Neufahrzeugen (Alter = 0)

Alter	Pkw Benzin	Pkw Diesel	LNf	LKW	SZ	KR	FLBus	SRBUS	LBus
0	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1	97%	91%	98%	97%	99%	98%	100%	79%	103%
2	94%	87%	92%	90%	87%	94%	98%	76%	102%
3	92%	84%	87%	84%	76%	90%	93%	73%	100%
4	90%	80%	82%	78%	67%	86%	87%	70%	98%
5	88%	77%	78%	72%	58%	82%	82%	67%	96%
6	87%	74%	73%	66%	51%	78%	77%	65%	93%
7	86%	71%	69%	61%	45%	75%	72%	62%	90%
8	85%	68%	65%	56%	39%	72%	67%	60%	87%
9	83%	65%	61%	51%	34%	69%	62%	57%	83%
10	82%	62%	57%	47%	30%	66%	57%	55%	80%
11	81%	59%	54%	42%	26%	63%	53%	53%	76%
12	80%	57%	51%	39%	23%	60%	48%	51%	73%
13	78%	54%	48%	35%	20%	58%	44%	49%	69%
14	77%	52%	45%	31%	18%	55%	40%	47%	65%
15	75%	49%	43%	28%	16%	53%	37%	45%	62%
16	73%	47%	41%	25%	14%	51%	33%	43%	58%
17	72%	45%	39%	23%	12%	49%	29%	42%	55%
18	70%	43%	37%	21%	11%	47%	26%	40%	51%
19	68%	41%	35%	19%	9%	46%	23%	39%	49%
20	66%	39%	34%	17%	8%	44%	20%	37%	46%
21	64%	37%	33%	15%	7%	43%	17%	36%	44%
22	62%	36%	32%	14%	6%	42%	14%	35%	42%

Alter	Pkw Benzin	Pkw Diesel	LNF	LKW	SZ	KR	FLBus	SRBUS	LBus
23	60%	34%	31%	13%	5%	41%	12%	34%	40%
24	59%	33%	31%	13%	5%	40%	10%	33%	39%
25	58%	31%	31%	12%	4%	39%	7%	32%	38%
26	57%	30%	31%	12%	4%	39%	5%	32%	38%
27	57%	29%	31%	12%	3%	38%	4%	31%	38%
28	57%	28%	32%	12%	3%	38%	2%	31%	38%
29	57%	27%	32%	12%	2%	38%	1%	30%	38%
30	57%	26%	33%	12%	2%	38%	0%	30%	38%

B.2.4 Fahrleistung nach Antriebsart und Größenklasse

In TREMOD wird die Fahrleistung der verschiedenen Fahrzeuge auch nach Antriebsart und Größenklasse gewichtet. Dies bezieht sich darauf, dass Diesel- und Benzinfahrzeuge sowie Fahrzeuge mit alternativen Antrieben anders genutzt werden. Typischerweise legen Elektrofahrzeuge weniger Kilometer als konventionelle Fahrzeuge zurück. Da der Kraftstoffverbrauch sowie die Schadstoffemissionen sich je nach Antrieb und Größenklasse der Fahrzeuge stark unterscheiden, spielt diese Gewichtung wie die Gewichtung nach Fahrzeugalter eine wichtige Rolle.

Krafträder

Die Hubraumklassen der Krafträder in TREMOD und in der Inländerfahrleistung sind unterschiedlich. In Tabelle 125 ist die ausgewählte Zuordnung zusammengestellt.

Tabelle 125: Zuordnung und mittlere FL für die Krafträder nach Größenklasse in TREMOD und in der HB

TREMOD Unterkategorien	HB Unterkategorien	FL Gewichtung der Benzinkrafträder
Kleinkrafträder $\leq 50 \text{ cm}^3$	KR $<125 \text{ cm}^3$	1
KR Zwei-Takt $\leq 250 \text{ cm}^3$	$125 \leq \text{KR} < 500 \text{ cm}^3$	1
KR Vier-Takt $\leq 250 \text{ cm}^3$	$125 \leq \text{KR} < 500 \text{ cm}^3$	1
KR Vier-Takt $> 250 \text{ cm}^3$	KR $\geq 500 \text{ cm}^3$	2

Aufgrund unzureichender Datenlage werden die Fahrleistungen der E-Krafträder gleich den Benzin-Krafträdern gesetzt. Alle Unterkategorien sind mit 1 gewichtet außer der Krafträder über 500 cm^3 , die zweimal mehr fahren. Diese werden der TREMOD-Kategorie $> 250 \text{ cm}^3$ zugeordnet.

Personenkraftwagen

Da die Größenklassen in TREMOD nicht mehr unterschieden werden, wird in Tabelle 126 nur die Gewichtung der mittleren Fahrleistung nach Antrieb dargestellt. Diesel Pkw legen ca. zweimal mehr km zurück als Benziner, die etwa 10.700 km jährliche Fahrleistung erbringen, gefolgt von Erdgas- und Flüssiggasfahrzeugen. Elektrofahrzeuge fahren durchschnittlich 8.700 km pro Jahr. In Tabelle 35 Gewichtung der mittleren FL der Pkw nach Antriebsart ist die Gewichtung der mittlere jährliche Fahrleistung der Pkw gegenüber Benzinfahrzeugen dargestellt.

Tabelle 126: Gewichtung der mittleren FL der Pkw nach Antriebsart

Pkw nach Antriebsart	Mittlere FL Gewichtung
Benzin	1
Diesel	1,9
Flüssiggas	1,7
Erdgas	1,8
Elektro	0,8
Hybrid	1,4

Kraftomnibusse

Die Größe der Busse lässt sich in der HB nur nach Anzahl von Plätzen unterscheiden. Diese Unterteilung wurde den TREMOD-Kategorien anhand von Angaben verschiedener Bustypen zugeordnet. Die Buskategorien wurden den passenden Einsatzzwecken der HB zugeordnet. Für diese Zuordnungen wurde für jede Buskategorie die Fahrleistungsrelation nach Fahrzeuggröße aus der HB abgeleitet. Tabelle 127 zeigt die Zuordnungen für die Busse und die aus der HB resultierenden Fahrleistungsrelationen.

Tabelle 127: Gewichtung der FL nach Größenklasse laut TREMOD und HB für Busse

TREMOD Unterkategorien	HB Unterkategorien	FL Gewichtung
Fernlinienbus <= 18t	Fernlinienverkehr bis 50 Plätze	1
Fernlinienbus > 18t	Fernlinienverkehr ab 51 Plätze	0,934
Sonstiger Reisebus <= 18t	Gelegenheitsverkehr bis 50 Plätze	1
Sonstiger Reisebus > 18t	Gelegenheitsverkehr ab 51 Plätze	1,456
Nahlinienbus<=15t	Linienverkehr 9 bis 16 Plätze	1
Nahlinienbus 15t bis <=18t	Linienverkehr 17 bis 40 Plätze	1,326
Nahlinienbus>18t	Linienverkehr ab 41 Plätze	1,2

Leichte Nutzfahrzeuge

Bei den leichten Nutzfahrzeugen können die Fahrleistungen nach Antrieb und Größe basierend auf den Ergebnissen der HB unterschieden werden. Die mittleren Fahrleistungen der CNG- und Diesel-Fahrzeuge liegen etwa auf gleichem Niveau, während die Fahrleistung der

Elektrofahrzeuge ca. die Hälfte der Fahrleistung der Dieselfahrzeuge ausmacht (siehe Tabelle 128).

Tabelle 128: Gewichtung der FL nach Größenklasse laut TREMOD und HB für LNF

TREMOD Unterkategorien	HB Unterkategorien	Diesel	CNG	BEV
LNF M+N1-I	0 bis 2t	1	1,1	0,4
LNF N1-II	>2t bis 2,8t	1,2	0,9	0,6
LNF N1-III	>2,8t bis 3,5t	1,5	1,4	0,6

Schwere Nutzfahrzeuge

Mit einer zusätzlichen Auswertung der Ergebnisse der HB durch IVT wurden Fahrleistungen nach Größenklassen in der TREMOD-Struktur bereitgestellt. Die Ergebnisse der Fahrleistungsgewichtung nach Antriebsart und Größenklasse sind in Tabelle 129 abgebildet.

Tabelle 129: Gewichtung der FL nach Größenklasse und Antriebsart für die Lkw ohne Anhänger

TREMOD Unterkategorien	Diesel	CNG	BEV
Solo Lkw <=7,5t	1	-	0,5
Solo Lkw >7,5-12t	1,8	0,9	-
Solo Lkw >12-14t	0,8	0,9	-
Solo Lkw >14-20t	1,7	-	-
Solo Lkw >20-26t	2,8	-	-
Solo Lkw >26-28t	2,4	-	-
Solo Lkw >28-32t	1,6	-	-
Solo Lkw >32t	1,8	-	-

Es wird die Annahme getroffen, dass die mittlere Fahrleistung der Lkw mit Anhänger und Sattelzüge auf gleichem Niveau liegen. Die in Tabelle 130 dargestellte Gewichtung zeigt, dass die großen Sattelzüge (über 34 t) mit fast 100.000 km pro Jahr eine sehr hohe Fahrleistung erbringen (ca. 3,5 Mal mehr als die Fahrleistung der übrigen Gewichtsklassen von SZ).

Tabelle 130: Gewichtung der mittleren FL nach Größenklasse der Lkw mit Anhänger und Sattelzüge

TREMOD Unterkategorien	Diesel
LZ/SZ >20-28t	1
LZ/SZ >28-34t	1
LZ/SZ >34-40t	3,5
LZ/SZ CNG	1
LZ/SZ LNG	1

Da keine alternativen Antriebe in der HB für die Sattelzüge erhoben wurden, wird die Fahrleistung der Diesel-Sattelzüge angenommen.

B.2.5 Aktualisierung der Fahrleistungszeitreihe in TREMOD

Mit der FLU 1993 und den in Kapitel B.2.2 abgeleiteten Fahrleistungen für 2014 liegen Eckwerte für die vollständigen Fahrleistungen in der Differenzierung nach Fahrzeug- und Straßentypen für 1993 und 2014 vor. Für die Zwischenjahre gibt es keine vollständigen Informationen. Daher muss die Zeitreihe mit Hilfe der vorliegenden Informationen ermittelt und mit plausiblen Annahmen ergänzt werden. Das Vorgehen ist wie folgt:

- ▶ Ermittlung der Gesamtfahrleistung für einzelne Fahrzeugkategorien aus der Inländerfahrleistung, im Wesentlichen abgestützt auf die Zeitreihe nach VIZ und (Kalinowska et al. 2005) (Pkw, motorisierte Zweiräder), der Entwicklung des Fahrzeugbestands und der Interpolation der durchschnittlichen Fahrleistung je Fahrzeug zwischen 1993, 2002 und 2014 (LNF, übrige Kfz) und der Interpolation der Fahrleistung zwischen 1993, 2002 und 2014 (Busse). Bei diesen Fahrzeugkategorien besteht keine oder nur eine geringe Differenz zwischen der Inländer- und Inlandsfahrleistung: bei den Pkw wurde bis 2013 wie bisher das Fahrleistungssaldo aus (Kalinowska et al. 2005) berücksichtigt, ab 2014 wird Inländer- und Inlandsfahrleistung gleich gesetzt. Bei den LNF wurde der Saldo bis 2002 als ausgeglichen und zwischen 2002 und 2014 als zunehmend (Inlandsfahrleistung > Inländerfahrleistung) angenommen. Bei den motorisierten Zweirädern und Bussen wurde der Saldo als ausgeglichen angenommen.
- ▶ Übernahme der Fahrleistungen auf Autobahnen und Bundesstraßen aus den SVZ 1995, 2000, 2005, 2010 und 2015.
- ▶ Ergänzung der Zwischenjahre mit den Ergebnissen der VE-BFS; Aufteilung nach Fahrleistungsanteilen in den Zwischenjahren durch Interpolation der Ergebnisse der SVZ.
- ▶ Übernahme der Fahrleistungen auf Landesstraßen aus den SVZ 1995, 2000 und 2005; Interpolation der Zwischenjahre; da ab 2010 keine Fahrleistungsangaben aus der SVZ mehr vorliegen, wurden die Fahrleistungen zwischen 2005 und 2014 interpoliert.
- ▶ Übernahme der Fahrleistungen auf Kreisstraßen aus den SVZ 1995, 2000 und 2005; da in den Erhebungen nur Ergebnisse für die alten Bundesländer vollständig vorliegen, wurden die Fahrleistungen in den neuen Bundesländern über Zuschlagsfaktoren abgeschätzt (siehe Kapitel 2.2.2); Interpolation der Zwischenjahre; da ab 2010 keine Fahrleistungsangaben aus der SVZ mehr vorliegen, wurden die Fahrleistungen zwischen 2005 und 2014 interpoliert.
- ▶ Bei den sonstigen außerörtlichen Straßen wurden 1993 die Gemeindestraßen separat erfasst. In der VZ 2014 wurde der Erfassungsumfang um das gesamte nicht-qualifizierte Straßennetz erweitert. Da jedoch keine Möglichkeit besteht, zwischen beiden Erhebungen eine saubere Abgrenzung herzustellen und die Fahrleistungsanteile gemessen an der Gesamtfahrleistung gering sind, werden die beiden Kategorien zusammen betrachtet und die Fahrleistungen zwischen 1993 und 2014 interpoliert.

Zur Ableitung der Innerortsfahrleistung gibt es je nach Fahrzeugkategorie unterschiedlich Ansätze:

- ▶ Innerortsfahrleistung als Differenz zwischen der Gesamtfahrleistung und den Fahrleistungen auf den Autobahnen und Außerortsstraßen. Dieses Verfahren wurde bei den Fahrzeugkategorien angewandt, bei denen die Gesamtfahrleistung vorgegeben war: Pkw, motorisierten Zweiräder, LNF, Busse und übrige Kfz.
- ▶ Interpolation der Innerortsfahrleistung zwischen 1993 und 2014; dieses Verfahren wurde bei den Fahrzeugkategorien verwendet, für die keine anderweitigen Informationen zur Gesamtfahrleistung vorlagen: Lkw und Sattelzüge. Bei diesen Fahrzeugkategorien ergibt sich die Gesamtfahrleistung aus der Summe der nach den beschriebenen Ansätzen ermittelten Fahrleistungen für jeden Straßentyp.
- ▶ Schließlich wurden die Fahrleistungen von West- und Ostdeutschland 1990 bis 1993, die nicht von der Anpassung der Fahrleistungen betroffen sind, zusammengefasst.
- ▶ Alle Fahrleistungen wurden im Rahmen der TREMOD-Aktualisierung bis 2018 fortgeschrieben. Grundlage waren vor allem die KBA-Inländerfahrleistungen (KBA 2018) und die Mittelfristprognose des BMVI (Intraplan 2019). Leider gab es bis Mitte 2019 keine zusammenfassenden Berichte der BASt zur Verkehrsentwicklung auf den Bundesfernstraßen für die Jahre nach 2015, so dass die Anteile der Fahrleistungen nach Straßenkategorien geschätzt werden musste.

Die folgende Tabelle 131 zeigt die Zeitreihen der Fahrleistung für alle Fahrzeugkategorien nach Straßentypen von 1990 bis 2018.

Tabelle 131: Fahrleistung der Fahrzeugkategorien im Straßenverkehr nach Straßentypen in Deutschland 1990 bis 2018

FzKat	Jahr	AB	B	L	K	G	IO	Gesamt
BUS	1990	0,692	0,783	0,670	0,312	0,201	1,511	4,170
BUS	1991	0,707	0,686	0,583	0,272	0,175	1,635	4,058
BUS	1992	0,724	0,607	0,514	0,240	0,154	1,753	3,992
BUS	1993	0,981	0,627	0,429	0,217	0,143	1,533	3,931
BUS	1994	0,958	0,686	0,561	0,265	0,171	1,323	3,963
BUS	1995	0,924	0,738	0,692	0,313	0,198	1,083	3,948
BUS	1996	0,934	0,745	0,707	0,330	0,225	1,001	3,944
BUS	1997	0,954	0,752	0,722	0,348	0,252	0,916	3,944
BUS	1998	0,946	0,753	0,738	0,365	0,280	0,865	3,947
BUS	1999	0,962	0,742	0,753	0,382	0,307	0,832	3,979
BUS	2000	0,925	0,731	0,768	0,400	0,334	0,845	4,003
BUS	2001	0,939	0,702	0,752	0,387	0,362	0,879	4,020

FzKat	Jahr	AB	B	L	K	G	IO	Gesamt
BUS	2002	0,949	0,683	0,735	0,374	0,389	0,904	4,034
BUS	2003	0,959	0,664	0,719	0,361	0,416	0,930	4,049
BUS	2004	0,970	0,644	0,703	0,348	0,443	1,049	4,158
BUS	2005	0,917	0,665	0,687	0,335	0,471	1,001	4,076
BUS	2006	0,962	0,643	0,674	0,327	0,498	0,923	4,028
BUS	2007	0,992	0,629	0,662	0,320	0,525	0,894	4,022
BUS	2008	0,966	0,604	0,650	0,312	0,552	0,836	3,922
BUS	2009	0,837	0,587	0,638	0,305	0,580	1,056	4,002
BUS	2010	0,856	0,590	0,625	0,297	0,607	1,061	4,037
BUS	2011	0,880	0,585	0,613	0,290	0,634	0,988	3,991
BUS	2012	0,866	0,552	0,601	0,282	0,661	1,018	3,981
BUS	2013	0,878	0,524	0,589	0,275	0,689	1,100	4,055
BUS	2014	0,887	0,494	0,576	0,267	0,716	1,241	4,182
BUS	2015	0,910	0,468	0,564	0,260	0,743	1,282	4,227
BUS	2016	0,928	0,472	0,570	0,262	0,743	1,291	4,267
BUS	2017	0,946	0,477	0,575	0,265	0,743	1,184	4,190
BUS	2018	0,964	0,482	0,581	0,267	0,743	1,168	4,206
HPV	2012	0,000	0,250	0,250	0,250	0,500	1,250	2,500
HPV	2013	0,000	0,350	0,350	0,350	0,700	1,750	3,500
HPV	2014	0,000	0,450	0,450	0,450	0,900	2,250	4,500
HPV	2015	0,000	0,550	0,550	0,550	1,100	2,750	5,500
HPV	2016	0,000	0,650	0,650	0,650	1,300	3,250	6,500
HPV	2017	0,000	0,750	0,750	0,750	1,500	3,750	7,500
HPV	2018	0,000	0,920	0,920	0,920	1,841	4,602	9,203
LNF	1990	4,221	2,667	2,045	0,910	0,745	3,670	14,259
LNF	1991	4,716	2,788	2,138	0,952	0,779	4,318	15,690
LNF	1992	5,240	2,865	2,197	0,978	0,801	5,014	17,096
LNF	1993	5,928	3,239	2,051	1,071	0,760	5,906	18,955
LNF	1994	5,652	3,284	2,519	1,121	0,918	7,658	21,152
LNF	1995	5,353	3,282	2,987	1,171	1,075	9,426	23,294
LNF	1996	5,794	3,346	2,993	1,199	1,232	10,201	24,765
LNF	1997	6,326	3,409	2,998	1,227	1,390	10,835	26,185

FzKat	Jahr	AB	B	L	K	G	IO	Gesamt
LNF	1998	6,930	3,485	3,004	1,255	1,547	11,531	27,751
LNF	1999	7,538	3,577	3,010	1,283	1,704	12,679	29,791
LNF	2000	8,112	3,651	3,016	1,311	1,862	13,588	31,541
LNF	2001	8,547	3,644	2,915	1,260	2,019	15,160	33,545
LNF	2002	9,023	3,683	2,814	1,209	2,176	15,752	34,658
LNF	2003	9,504	3,727	2,713	1,158	2,333	15,717	35,153
LNF	2004	10,005	3,763	2,612	1,107	2,491	15,512	35,489
LNF	2005	10,381	3,731	2,511	1,055	2,648	15,612	35,938
LNF	2006	10,514	3,805	2,858	1,290	2,805	15,407	36,679
LNF	2007	10,812	3,921	3,205	1,524	2,963	15,405	37,830
LNF	2008	10,899	3,970	3,552	1,759	3,120	14,990	38,290
LNF	2009	11,252	4,066	3,899	1,993	3,277	14,267	38,755
LNF	2010	11,358	4,119	4,246	2,228	3,435	13,840	39,226
LNF	2011	11,727	4,219	4,593	2,463	3,592	13,109	39,703
LNF	2012	11,682	4,181	4,940	2,697	3,749	12,936	40,185
LNF	2013	11,909	4,165	5,287	2,932	3,907	12,474	40,673
LNF	2014	12,283	4,249	5,634	3,166	4,064	13,098	42,494
LNF	2015	12,688	4,285	5,981	3,401	4,221	14,102	44,678
LNF	2016	13,295	4,451	6,280	3,571	4,263	14,905	46,765
LNF	2017	13,915	4,620	6,579	3,741	4,306	15,805	48,965
LNF	2018	14,549	4,791	6,878	3,911	4,348	16,821	51,298
MZR	1990	1,501	2,816	3,146	1,839	1,570	4,862	15,734
MZR	1991	1,676	2,617	2,808	1,600	1,316	4,112	14,128
MZR	1992	1,821	2,493	2,562	1,418	1,115	3,358	12,766
MZR	1993	1,598	2,128	2,190	1,234	1,008	3,430	11,588
MZR	1994	1,573	2,156	2,252	1,261	1,008	3,087	11,339
MZR	1995	1,543	2,154	2,315	1,287	1,009	3,543	11,851
MZR	1996	1,493	2,173	2,362	1,329	1,009	4,211	12,577
MZR	1997	1,461	2,191	2,409	1,370	1,009	4,736	13,177
MZR	1998	1,437	2,218	2,457	1,411	1,009	5,133	13,664
MZR	1999	1,404	2,255	2,504	1,452	1,009	5,947	14,571
MZR	2000	1,359	2,280	2,551	1,494	1,009	6,124	14,816

FzKat	Jahr	AB	B	L	K	G	IO	Gesamt
MZR	2001	1,343	2,247	2,505	1,456	1,009	6,172	14,731
MZR	2002	1,332	2,243	2,458	1,418	1,009	6,629	15,088
MZR	2003	1,319	2,241	2,411	1,380	1,009	6,567	14,927
MZR	2004	1,307	2,235	2,364	1,341	1,009	6,857	15,113
MZR	2005	1,277	2,187	2,317	1,303	1,009	7,305	15,399
MZR	2006	1,270	2,101	2,344	1,329	1,009	7,240	15,294
MZR	2007	1,282	2,039	2,371	1,354	1,009	7,566	15,622
MZR	2008	1,269	1,940	2,398	1,380	1,010	7,461	15,458
MZR	2009	1,288	1,865	2,425	1,405	1,010	7,672	15,664
MZR	2010	1,277	1,770	2,452	1,431	1,010	7,252	15,192
MZR	2011	1,298	1,692	2,479	1,457	1,010	6,858	14,793
MZR	2012	1,272	1,558	2,505	1,482	1,010	6,593	14,422
MZR	2013	1,276	1,436	2,532	1,508	1,010	6,421	14,183
MZR	2014	1,295	1,349	2,559	1,533	1,010	6,470	14,216
MZR	2015	1,316	1,245	2,586	1,559	1,010	6,809	14,525
MZR	2016	1,343	1,257	2,612	1,574	1,010	6,740	14,536
MZR	2017	1,369	1,270	2,638	1,590	1,010	6,663	14,539
MZR	2018	1,395	1,282	2,664	1,605	1,010	6,722	14,679
PKW	1990	124,304	79,837	65,291	31,696	25,076	162,369	488,574
PKW	1991	130,902	82,502	67,470	32,754	25,913	156,840	496,380
PKW	1992	138,244	85,909	70,256	34,107	26,983	154,489	509,987
PKW	1993	141,626	88,610	69,441	34,629	27,088	160,606	522,000
PKW	1994	143,992	90,723	74,193	36,018	28,495	150,679	524,100
PKW	1995	145,993	91,775	78,949	37,410	29,903	146,870	530,900
PKW	1996	147,169	91,587	79,532	38,076	31,313	147,522	535,200
PKW	1997	150,330	91,398	80,125	38,749	32,726	144,372	537,700
PKW	1998	154,668	91,557	80,722	39,424	34,141	146,589	547,100
PKW	1999	158,521	92,102	81,301	40,089	35,551	151,336	558,900
PKW	2000	161,273	92,171	81,889	40,759	36,964	147,244	560,300
PKW	2001	162,676	91,513	79,804	39,599	38,375	159,328	571,294
PKW	2002	164,713	92,047	77,728	38,445	39,788	166,774	579,495
PKW	2003	166,663	92,662	75,653	37,292	41,202	161,024	574,496

FzKat	Jahr	AB	B	L	K	G	IO	Gesamt
PKW	2004	168,745	93,099	73,573	36,135	42,614	172,820	586,985
PKW	2005	168,623	91,834	71,492	34,979	44,026	163,821	574,776
PKW	2006	169,563	92,613	72,810	36,054	45,631	163,784	580,455
PKW	2007	171,443	93,529	73,617	36,807	47,053	161,612	584,060
PKW	2008	169,949	92,801	74,419	37,557	48,473	157,869	581,068
PKW	2009	172,606	93,198	75,225	38,309	49,896	162,203	591,437
PKW	2010	171,425	92,618	76,032	39,062	51,320	164,905	595,363
PKW	2011	176,368	94,174	76,842	39,817	52,746	165,120	605,066
PKW	2012	175,061	92,667	77,654	40,573	54,175	166,244	606,373
PKW	2013	177,834	91,647	78,465	41,328	55,603	166,562	611,439
PKW	2014	182,763	92,845	79,277	42,084	57,032	168,065	622,067
PKW	2015	188,143	92,976	80,082	42,834	58,449	167,031	629,516
PKW	2016	191,938	93,913	80,884	43,263	58,450	168,252	636,701
PKW	2017	195,718	94,847	81,687	43,692	58,451	167,858	642,254
PKW	2018	199,484	95,778	82,489	44,121	58,452	161,938	642,262
SNF	1990	17,168	5,681	3,454	1,429	0,920	6,755	35,408
SNF	1991	20,655	6,708	4,039	1,667	1,071	8,314	42,455
SNF	1992	20,871	6,782	4,079	1,683	1,082	8,689	43,187
SNF	1993	20,484	6,758	3,835	1,641	0,974	8,696	42,389
SNF	1994	21,828	7,185	4,256	1,749	1,121	9,133	45,272
SNF	1995	23,157	7,522	4,678	1,856	1,270	9,563	48,045
SNF	1996	24,408	7,723	4,683	1,892	1,419	9,723	49,849
SNF	1997	26,036	7,925	4,689	1,927	1,569	9,957	52,102
SNF	1998	27,043	8,068	4,694	1,962	1,720	10,036	53,523
SNF	1999	28,857	8,085	4,699	1,998	1,872	10,245	55,756
SNF	2000	29,197	8,099	4,704	2,033	2,025	10,353	56,411
SNF	2001	29,677	7,942	4,529	1,943	2,179	9,926	56,196
SNF	2002	30,067	7,891	4,353	1,851	2,333	9,698	56,194
SNF	2003	30,441	7,846	4,177	1,760	2,489	9,513	56,227
SNF	2004	30,844	7,785	4,000	1,668	2,646	9,207	56,150
SNF	2005	29,201	8,227	3,823	1,575	2,803	8,743	54,373
SNF	2006	31,424	8,238	3,820	1,635	2,980	9,213	57,310

FzKat	Jahr	AB	B	L	K	G	IO	Gesamt
SNF	2007	33,114	8,279	3,780	1,674	3,140	9,505	59,492
SNF	2008	33,004	8,175	3,740	1,713	3,301	9,443	59,377
SNF	2009	29,240	8,171	3,699	1,752	3,463	8,566	54,891
SNF	2010	30,634	8,456	3,659	1,791	3,626	8,782	56,948
SNF	2011	31,584	8,696	3,619	1,830	3,790	8,948	58,467
SNF	2012	31,148	8,514	3,578	1,869	3,954	8,739	57,800
SNF	2013	31,661	8,402	3,537	1,908	4,120	8,727	58,355
SNF	2014	32,057	8,237	3,496	1,946	4,286	8,678	58,700
SNF	2015	32,996	8,127	3,451	1,982	4,434	8,634	59,624
SNF	2016	33,655	8,209	3,486	2,002	4,434	8,735	60,521
SNF	2017	34,314	8,290	3,521	2,022	4,434	8,987	61,569
SNF	2018	34,974	8,372	3,556	2,042	4,435	9,127	62,505
sonstige	1990	1,207	0,420	0,599	0,545	0,589	1,593	4,955
sonstige	1991	1,296	0,450	0,642	0,584	0,631	1,661	5,265
sonstige	1992	1,387	0,480	0,685	0,623	0,674	1,726	5,575
sonstige	1993	1,460	0,812	0,773	0,603	0,453	2,092	6,192
sonstige	1994	1,697	1,166	0,891	0,656	0,480	1,908	6,797
sonstige	1995	1,811	1,210	0,952	0,671	0,492	1,804	6,941
sonstige	1996	1,902	1,225	0,952	0,677	0,502	1,809	7,067
sonstige	1997	1,995	1,225	0,941	0,675	0,508	1,849	7,193
sonstige	1998	2,079	1,218	0,927	0,671	0,512	1,889	7,295
sonstige	1999	2,220	1,238	0,930	0,678	0,518	1,812	7,396
sonstige	2000	2,300	1,240	0,925	0,680	0,521	1,589	7,254
sonstige	2001	2,417	1,245	0,899	0,653	0,526	1,808	7,548
sonstige	2002	2,515	1,252	0,865	0,622	0,526	1,878	7,659
sonstige	2003	2,612	1,259	0,831	0,591	0,526	1,821	7,641
sonstige	2004	2,729	1,273	0,803	0,564	0,526	1,855	7,749
sonstige	2005	2,758	1,278	0,771	0,535	0,523	1,905	7,769
sonstige	2006	1,048	0,289	0,211	0,183	0,308	1,146	3,186
sonstige	2007	1,135	0,291	0,202	0,177	0,294	0,989	3,088
sonstige	2008	1,174	0,288	0,192	0,170	0,277	0,758	2,860
sonstige	2009	1,131	0,289	0,183	0,164	0,259	0,828	2,853

FzKat	Jahr	AB	B	L	K	G	IO	Gesamt
sonstige	2010	1,203	0,294	0,174	0,157	0,240	0,776	2,843
sonstige	2011	1,291	0,306	0,164	0,150	0,219	0,707	2,837
sonstige	2012	1,327	0,305	0,155	0,142	0,196	0,716	2,841
sonstige	2013	1,400	0,305	0,146	0,135	0,172	0,688	2,845
sonstige	2014	1,477	0,307	0,136	0,127	0,146	0,663	2,857
sonstige	2015	1,519	0,307	0,135	0,128	0,150	0,505	2,745
sonstige	2016	1,550	0,310	0,136	0,129	0,150	0,544	2,819
sonstige	2017	1,580	0,313	0,138	0,130	0,150	0,378	2,690
sonstige	2018	1,610	0,316	0,139	0,132	0,150	0,409	2,757

C Aktualisierung der Kraftstoffverbräuche in HBEFA und TREMOD

C.1 Aufgabenstellung

Die Kraftstoffverbräuche der Pkw werden für alle "HBEFA-Länder" (also Deutschland, Schweiz, Österreich, Frankreich, Schweden und Norwegen) in HBEFA Version 4.1 (Notter et al. 2019), basierend auf den in (Althaus et al. 2019) beschriebenen Ergebnisse.

C.2 Eingangsdaten

Für die Aktualisierung der Kraftstoffverbräuche HBEFA 4.1 liegen folgende Inputs vor:

- ▶ Basis-Verbrauchsfaktoren in g/Fzkm resp. MJ/Fzkm nach HBEFA-Fahrzeugschicht und HBEFA-Verkehrssituation aus dem PHEM-Modell der TU Graz (Hausberg S. 2003). Die HBEFA-Fahrzeugschichten bei den Pkw sind definiert nach Fahrzeugkategorie (also Pkw), Technologie (Otto, Diesel, etc.), und Emissionsstandart (z. B. Euro-3, Euro 6d-temp, etc.)¹. Die Verkehrssituationen sind definiert nach Umgebungstyp (städtisch/Agglomeration bzw. ländlich), Straßentyp (z. B. Autobahn, Verteiler, etc.), Geschwindigkeitslimit (z. B. 50 km/h) und "Level of Service", d.h. Verkehrsdichtestufe von freifließend bis Stau. Die Verkehrssituationen unterscheiden zusätzlich sieben Längsneigungskategorien von -6% bis +6%.
- ▶ CO₂-Monitoring-Daten: Der Durchschnitt der CO₂-Emissionen nach NEFZ für alle Neuzulassungen nach Jahr und Technologie (EEA 2018).
- ▶ Realverbrauchszuschläge (ausgedrückt in % der CO₂-Monitoring-Werte) für die Neuzulassungen nach Jahr und Technologie.
- ▶ Verteilung der Verkehrssituationen, ausgedrückt als Anteil in % an den totalen Fahrleistungen pro Fahrzeugkategorie, in allen HBEFA-Ländern. Die entsprechenden Angaben für Deutschland sind in Kapitel 2.2.3.4. dargestellt
- ▶ Anteile der Emissionsstandards (Euro-Stufen) an den Neuzulassungen pro Jahr und Technologie (siehe Kapitel 3.6.1).

¹ Bei den anderen Fahrzeugkategorien als den PKW (also Lieferwagen, Reisecars, Linienbusse, LKW und Motorrädern) werden in HBEFA 4.1 zusätzlich Größenklassen unterschieden. Bis zur Version HBEFA 3.3 wurden auch für PKW drei Größenklassen (nach Hubraumvolumen) unterschieden – diese wurden für HBEFA 4.1 aber zusammengefasst, da die Aussage einer Unterscheidung nach Hubraum immer weniger Relevanz hat. Einige Länder verwenden eigene Segmentierungen der PKW (z. B. Deutschland: nach Kaufsegment), wofür aber wiederum in anderen Ländern keine Eingangsdaten vorliegen – somit existiert keine alternative, allgemein akzeptierte und mit verfügbaren Eingangsdaten implementierbare Segmentierung in Größenklassen.

C.3 Methodik

C.3.1 Kalibration der Kraftstoffeffizienz in HBEFA

In HBEFA werden die Kraftstoffverbräuche (und CO₂-Emissionen) der Neuzulassungen nach Land, Fahrzeugkategorie, Technologie/Größenklasse (also HBEFA-“Segment”) und Jahr mittels der folgenden Modellparameter kalibriert:

- ▶ “Base correction”: Ein für ein Basisjahr (frei wählbar, für Pkw wurde bisher jeweils das Jahr 2002 verwendet) festzulegender Korrekturfaktor, welcher die Kraftstoffverbräuche des entsprechenden Segments global (für alle Jahre der Zeitreihe) nach oben oder unten korrigiert. Dieser beinhaltet einerseits den Realverbrauchszuschlag im Basisjahr und andererseits Abweichungen des Kraftstoffverbrauchs aufgrund der durchschnittlichen Fahrzeuggröße in der entsprechenden Flotte eines Landes.
- ▶ “Reduction Rate” und “UseFactor”: Die “Reduction Rate” wird für jedes Jahr der Zeitreihe (pro Segment) individuell festgelegt und bildet die zeitliche Entwicklung der Kraftstoffeffizienz ab. Optional können die individuellen “Reduction Rates” mit individuellen “UseFactors” skaliert werden, welche den im realen Betrieb realisierten Anteil der Effizienzverbesserung gegenüber dem Vorjahr ausdrücken.

In TREMOD werden die mit dem beschriebenen Verfahren ermittelten Verbrauchswerte für alle Fahrzeuge bis zum Jahr 2018 direkt übernommen. Erst im Szenario erfolgt die Berechnung des Verbrauchs neuer, zukünftig zugelassener Fahrzeuge über die „Reduction Rate“. Ausgegangen wird vom Verbrauch der im Jahr 2018 zugelassenen Fahrzeuge. Die verwendeten „Reduction Rates“ im Trend-Szenario werden in Kapitel 3.5 beschrieben.

C.3.2 Neuer Preprocessor für Fahrzeugkategorien mit CO₂-Monitoring

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie lassen sich mit der in Kap. C.3.1 beschriebenen Kalibrationsmethode von HBEFA grundsätzlich abbilden. Allerdings müssen deren Eingangsdaten (s. Kap. C.2) in die oben beschriebenen Parameter der HBEFA-Kalibrationsmethode übersetzt werden. Zu diesem Zweck wurde ein neuer Preprocessor in HBEFA 4.1 entwickelt, welcher die in Kap. C.2 aufgelisteten Inputs direkt als Eingangsdaten akzeptiert und daraus die in Kap. C.3.1 beschriebenen Kraftstoffeffizienz-Kalibrationsparameter von HBEFA berechnet.

Die gewählte Art der Umsetzung, also die Ergänzung der bisherigen HBEFA-Kalibrationsmethodik mit einem neuen Preprocessor, hat (im Vergleich zu anderen denkbaren Arten der Umsetzung, wie einer Anpassung oder Ersatz der bisherigen Methode) folgende Vorteile:

- ▶ Für Pkw und Lieferwagen, für welche CO₂-Monitoring-Daten und Realverbrauchszuschläge vorliegen (oder sich schätzen lassen), bietet der neue Preprocessor eine einfachere und transparentere Vorgehensweise bei der Kalibration der Kraftstoffeffizienz.

- ▶ Für Fahrzeugkategorien, für welche kein CO₂-Monitoring stattfindet, lassen sich zukünftig unterstellte Effizienzverbesserungen weiterhin wie bisher als relative Minderungsfaktoren mit Bezug auf ein bestimmtes Basisjahr leicht erfassen.
- ▶ An der Funktionalität des HBEFA-Flottenmodells, in welchem die Eingangsparameter zusammen mit anderen Flotteninputs in die direkten Inputs für Emissionsfaktorenabfrage und Emissionsmodell von HBEFA weiterverarbeitet werden, musste nichts verändert werden, womit Aufwand eingespart werden konnte.

Der neue Preprocessor ist in der Dokumentation von HBEFA 4.1 (Notter et al. 2019) im Detail beschrieben. Seine Funktionsweise lässt sich in Kürze wie folgt zusammenfassen:

- ▶ In einem ersten Schritt werden pro Segment und Jahr individuelle Kalibrationsfaktoren hergeleitet. Diese berechnen sich aus dem Quotient aus
 - a) dem durchschnittlichen “Ist-Verbrauchsfaktor”, welcher dem nach Verkehrssituationen-Anteil und Anteil der Euro-Klassen an den Neuzulassungen fahrleistungsgewichteten Durchschnitt der Verbrauchsfaktoren aus PHEM entspricht, und
 - b) dem “Soll-Verbrauchsfaktor”, welcher dem CO₂-Monitoring-Wert plus dem Realverbrauchszuschlag entspricht.
 In a) lässt sich optional ein Kaltstartanteil miteinberechnen, sofern der Realverbrauchszuschlag den Kaltstart mit enthält:

$$\text{segment,Jahr} = \frac{\sum_{\text{Subsgm,Jahr,VS,Land}} \frac{h}{\sum_{\text{Subsgm,Jahr,Land}}} (1 + \dots)}{2 \sum_{\text{segment,Jahr,Land}} (1 + h \dots)_{\text{segment,Jahr,Land}}}$$

wobei:

- Fzkm* = Fahrzeugkilometer
- Subsgm* = HBEFA-Subsegment (Segment + Emissionsstandard)
- VS* = Verkehrssituation
- CO₂Monitoring* = CO₂-Emission/Fzkm gemäss NEFZ

- ▶ In einem zweiten Schritt werden aus den Kalibrationsfaktoren des ersten Schrittes die Parameter “Base correction” und “Reduction Rate” hergeleitet. Dabei entspricht die “Base correction” dem Kalibrationsfaktor im Basisjahr, und die “Reduction Rates” den relativen Änderungen der Kalibrationsfaktoren von Jahr zu Jahr.

C.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Aktualisierung der Kraftstoffverbräuche sind in der im September 2019 publizierten HBEFA-Version 4.1 abrufbar.

D Aktualisierung der Methodik und Datengrundlage Flugverkehr

D.1 Anpassung von Flugzeugkenngößen

In TREMOD sind Flugzeugtypen über diverse Kenngrößen definiert: Neben den Emissionsfaktoren und Verbräuchen sind dies das maximale Abfluggewicht (MTOW), die Nutzlast, die Sitzplatzanzahl und der Triebwerkstyp. Im Rahmen der Aktualisierung wurden diese Werte eingehend überprüft. Die Notwendigkeit dieser Überprüfung lag insbesondere an der nun besseren Datenverfügbarkeit und an großen Differenzen bzgl. der in TREMOD errechneten Auslastungen zu (Destatis 2018).

Die genannten Kenngrößen wurden durch diverse Onlinequellen und Datenblätter der Flugzeughersteller recherchiert und aktualisiert. Bei einem Großteil der bereits enthaltenen Daten war kein Anpassungsbedarf nötig. Für circa 60 % der Flugzeugtypen erfolgt eine Anpassung der Sitzplatzanzahl. So reduzierten sich die Platzkilometer des Jahres 2017 durch die Anpassung um 4 %. Die Auslastung stieg gegenüber dem Vorjahreswert somit um diesen Faktor. Anzumerken ist hierbei, dass es für einen einzelnen Flugzeugtyp eine Vielzahl an Sitzplatzkonfigurationen gibt. Dadurch ist eine genaue Ermittlung der mittleren Sitzplatzanzahl jedes einzelnen Flugzeugtyps erschwert.

Neben der Aktualisierung bestehender Flugzeugtypen wurden drei zusätzliche Typen in TREMOD integriert.

D.2 Anpassung von Emissionsfaktoren und Verbräuche im Flugverkehr

Eine Anpassung der flugzeugtypspezifischen Emissionsfaktoren und Verbräuche erfolgte auf zwei Ebenen. Zum einen wurde die verwendete Methodik zur Bestimmung der LTO-Emissionen und -verbräuche so angepasst, dass auch eine Anpassung der verwendeten Eingangsdaten unabdingbar wurde (weitere Erläuterungen hierzu siehe Abschnitt D.3). Zum anderen wurden die Emissionsfaktoren und Verbräuche einiger Flugzeugtypen angepasst und ergänzt (Integration drei neuer Flugzeugtypen).

Bei der letztjährigen Modellaktualisierung erfolgte die Berücksichtigung neuer Kennwerte anhand des EMEP/EEA Guidebook 2016, respektive den dazugehörigen Berechnungsprogrammen „1.A.3.a Aviation – Annex 5 – LTO emissions calculator 2016“ und „1.A.3.a Aviation – Annex 5 – Master emissions calculator 2016“, über die rund die Hälfte der Flugzeugtypen abgebildet ist.

Für die restlichen Typen wurden vor der Aktualisierung entweder Faktoren vergleichbarer Flugzeugtypen verwendet oder ein Regressionsmodell angewendet, welches anhand der Antriebsart und des MTOW die Faktoren ermittelte. Da hierdurch insbesondere modernere (und auch sehr alte) Flugzeugtypen unzureichend abgebildet werden, wird im Rahmen der vorliegenden TREMOD Aktualisierung von diesem Regressionsmodell Abstand genommen. Grund hierfür ist, dass das Regressionsmodell einen Mittelwert aller Flugzeugtypen (differenziert nach Antriebsart und MTOW) darstellt. Da die berücksichtigte Flotte jedoch auch veraltete Flugzeugtypen enthält, konnten durch die Regression bspw. Effizienzverbesserungen nicht korrekt abgebildet werden.

Darüber hinaus werden die Abweichungen und Unsicherheiten bei der Verwendung eines solchen Modells als groß erachtet. Eine genauere Abschätzung kann demgegenüber durch die

Verwendung von Turbinendaten erfolgen, was durch die TREMOD Aktualisierung umgesetzt wurde.

Für ca. 17 % der Flugzeugtypen liegen keine Daten über das EMEP/EEA Guidebook 2016 vor. Allerdings sind die eingesetzten Triebwerkstypen in der ICAO *Aircraft Engine Emissions Databank* (ICAO 2019) enthalten, in der triebwerksspezifische Kraftstoffverbräuche, CO-, HC- und NO_x-Emissionen angegeben werden. Das Messverfahren folgt hierbei dem Vorgehen aus ICAO Annex 16 Volume II. Die Informationen werden von den Triebwerksherstellern bereitgestellt und die Datenbank wird durch die *European Aviation Safety Agency* (EASA) verwaltet.

Die Datenbank wird in regelmäßigen Abständen aktualisiert und bietet somit die Möglichkeit, auch neue Triebwerkstypen und somit auch neue Flugzeugtypen in TREMOD abzubilden. Da weitere Einflussfaktoren hierüber nicht berücksichtigt werden können, ist die Verwendung der Triebwerkskenndaten für die CCD-Phase jedoch lediglich als Näherung der Verbräuche und Emissionen eines Flugzeugtyps zu verstehen. Eine Aktualisierung der über diese Methode abgeleiteten Flugzeugtypen ist künftig über bessere Methoden, bspw. die Verwendung des BADA 3 Modells und/oder Advanced Emission Model von Eurocontrol zur Ermittlung der Kraftstoffverbräuche und Emissionen, denkbar. Eine mögliche Nutzung dieser Modelle wird zurzeit überprüft.

Die Methode zur Ermittlung der Verbräuche und Emissionen für die CCD-Phase anhand der Turbinendatenbank wird im Folgenden erläutert. Die LTO-Phase wird über eine andere Methode abgebildet, die in Abschnitt D.3 beschrieben wird.

Über das EMEP/EEA Guidebook 2016 liegen Informationen für eine Vielzahl von Flugzeugtypen vor. Für diese Typen sind die eingesetzten Turbinentypen ebenfalls bekannt. Sollte ein Flugzeugtyp nicht über das Guidebook definiert sein, jedoch seine verwendeten Turbinentypen in der Turbinendatenbank enthalten sein, werden die Kenndaten der Turbine mit vergleichbaren Turbinen aus dem Guidebook abgeglichen. Dabei wird unterstellt: Wenn Turbinen auf dem Prüfstand ähnliche Verbräuche und Emissionen in den einzelnen geprüften Lastzuständen aufweisen, so sind die Verbräuche und Emissionen im realen Betrieb ungeachtet von Faktoren wie Flugzeuggeometrie oder Flugzeuggewichts vergleichbar.

Ein Beispiel soll diesen Ansatz erläutern: Im Airbus A320 neo, für den keine Daten im Guidebook 2016 enthalten sind, wird das Triebwerk mit dem Code 15PW105 verwendet. Triebwerke mit ähnlichen Kenndaten (Verbräuche und Emissionen) sind im Guidebook jedoch abgebildet.

Tabelle 132 stellt die Verbräuche für die unterschiedlichen Lastzustände dar. Der Gewichtsanteil (A) gibt hierbei an zu welchem Anteil die jeweiligen Turbinentypen (i) in die Bestimmung der Kennwerte der unbekanntenen Turbine (j) miteingehen. Der Anteil bestimmt sich über folgende Gleichung:

$$A_i = \frac{\sum_{\text{Lastzustand}=1}^4 \frac{\text{Verbrauch}_{i,\text{Lastzustand}}}{|\text{Verbrauch}_{i,\text{Lastzustand}} - \text{Verbrauch}_{j,\text{Lastzustand}}|}}{\sum_{i=1}^n \sum_{\text{Lastzustand}=1}^4 \frac{\text{Verbrauch}_{i,\text{Lastzustand}}}{|\text{Verbrauch}_{i,\text{Lastzustand}} - \text{Verbrauch}_{j,\text{Lastzustand}}|}}$$

Für die Schadstoffe HC, CO und NO_x wird analog vorgegangen. Die PM-Emissionen werden dagegen kraftstoffspezifisch aus dem Guidebook 2016 für vergleichbare Flugzeug- bzw. Turbinentypen abgeleitet, da die Partikel nicht über die Turbinendatenbank gegeben ist.

Tabelle 132: Spezifischer Kraftstoffverbrauch in kg/s pro Turbine

Turbinen Code	Flugzeugtyp	100 % Last (Start)	85 % Last (Steigflug)	30 % Last (Landung)	7 % Last (Taxi)	Gewichtungsanteil
15PW105	A320 neo	0,80	0,66	0,23	0,09	-
1RR020	Fokker 100	0,76	0,63	0,23	0,11	23,4 %
4BR005	Boeing 717	0,83	0,69	0,24	0,10	36,4 %
11BR011	Gulfstream 650	0,79	0,65	0,22	0,09	40,2 %

Anmerkung: vereinfacht werden nur drei Referenzturbinen dargestellt. In die Ermittlung gehen sämtliche Turbinen mit ein, die im Guidebook gegeben sind. Turbinen mit großen Unterschieden (im Verbrauch) werden jedoch nur in vernachlässigbaren Umfang über einen sehr geringen Gewichtsanteil berücksichtigt. Quelle: (ICAO 2019)

Anhand der Verbräuche für jede Distanzklasse, die sich aus dem Guidebook der gegebenen Flugzeug- bzw. Turbinentypen ergeben, und unter Berücksichtigung der Gewichtsanteils können die Verbräuche der unbekanntnen Turbine bzw. des unbekanntnen Flugzeugtyps ermittelt werden. Die folgende Abbildung zeigt die CCD-Verbräuche der angeführten Turbinen für unterschiedliche Distanzklassen.

Abbildung 19: Kraftstoffverbrauch in der CCD-Phase pro Turbine vom A320 neo und von drei definierten Flugzeugtypen



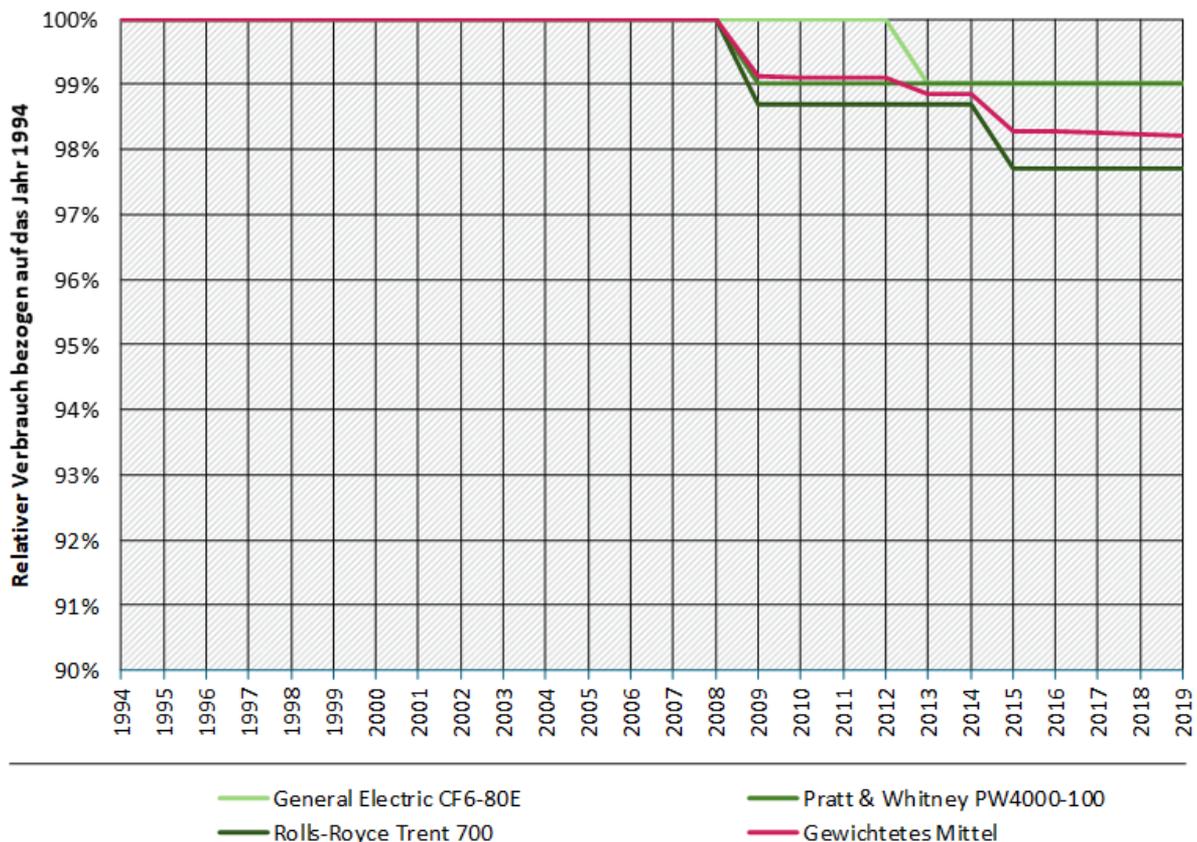
Anmerkungen: der Wert für den Airbus wurde über die o.g. Methodik ermittelt, die drei Referenzwerte sind über (European Environment Agency 2017) gegeben; Quellen: (ICAO 2019), (European Environment Agency 2017) und eigene Berechnung

Für Flugzeugtypen, die weder über das EMEP/EEA Guidebook 2016 noch über die Turbinendatenbank definiert sind, werden wie bisher Kennwerte vergleichbarer Flugzeugtypen (ähnliches MTOW und gleiche Antriebsart) ohne Anpassungen übernommen. Dies betrifft rund 32 % der definierten Flugzeugtypen und beinhaltet auch generische Flugzeugtypen wie bspw. „Flugzeuge bis 2 t“. Diese Typen sind insbesondere in den Daten der sonstigen Flugplätze und nicht gewerblichen Verkehre gegeben, da bei diesen Kategorien in den Statistiken keine detaillierte Differenzierung erfolgt und z.B. lediglich die Anzahl der Starts für Flugzeuge kleiner 2 t angegeben ist. Die Emissionen dieser generischen Flugzeugtypen wurden ebenfalls angepasst. Neben dem Guidebook 2016 und der ICAO Turbinendatenbank diente hierfür insbesondere die FOCA Datenbanken für Propellermaschinen und Drehflügler des Bundesamts für Zivilluftfahrt der Schweiz, siehe (BAZL 2009) und (BAZL 2017).

Ein weiteres definiertes Ziel der Aktualisierung war die Berücksichtigung von Effizienzsteigerungen von einzelnen Flugzeugtypen durch den Einsatz modernerer Triebwerke und Verbesserungen von bspw. eingesetzten Materialien und Aerodynamik der Flugzeugtypen. Zudem war der Anspruch, den Einsatz unterschiedlicher Triebwerkskonfigurationen eines Flugzeugtyps abzubilden. Grund hierfür ist, dass Flugzeugtypen lediglich statisch definiert werden und für den gesamten Zeitraum dieselben einheitlichen Verbräuche und Emissionsfaktoren gelten. Von der definierten Zielsetzung musste jedoch Abstand genommen werden.

Dies hat zwei Gründe: Da für jedes Flugzeugmodell zusätzlich die Anteile der eingesetzten Turbinentypen für jedes Jahr definiert werden müssten, wäre der Aufwand gegenüber dem Genauigkeitsgewinn deutlich zu hoch. Ein solches Vorgehen würde auf der einen Seite einen großen Zeitaufwand für die Recherche bedeuten und auf der anderen Seite würden die Datenmengen, die zu verarbeiten wären, deutlich zunehmen. Demgegenüber wäre die höhere Genauigkeit als gering einzuschätzen, wie das Beispiel aus Abbildung 1 verdeutlichen soll. Hier sind die eingesetzten Turbinentypen des Airbus A330 mitsamt ihren Effizienzsteigerungen (von Neuzulassungen) dargestellt. Zusätzlich wird der Mittelwert für den A330 gezeigt, der sich aus den Anteilen der Turbinen bestimmt. Hieraus ergibt sich, dass sich über einen Zeitraum von 25 Jahren eine durchschnittliche Effizienzsteigerung eines spezifischen Flugzeugtyps durch Verbesserungen der Turbine in Höhe von lediglich 0,07 % p.a. ergibt. Der zweite Grund ist die Datenverfügbarkeit. Die Anteile der eingesetzten Triebwerkstypen sind nicht in einer einzigen Datenbank verfügbar und zum Teil generell nicht ermittelbar, sodass an dem statischen Modell festgehalten wird.

Abbildung 20: Verbrauchsverbesserung von drei Turbinentypen (Einsatz im A330)



Quellen: (Rolls Royce 2019) und (IASG 2006)

D.3 Überarbeitung der LTO-Emissionen und -Verbräuche

Im Rahmen der hier beschriebenen Modellaktualisierung wurden die während der LTO-Phase auftretenden Verbräuche und Emissionen angepasst. In der Vergangenheit wurde ein LTO-Verbrauch pauschal für Deutschland flugzeugtypenspezifisch angesetzt. Jedoch unterscheiden sich die Flughäfen bezüglich ihrer Taxizeiten. Flughäfen, die geringere Taxizeiten aufweisen, sind dabei durch geringere LTO-Emissionen gekennzeichnet. Daten für die Taxizeiten deutscher Flughäfen sind über Eurocontrol verfügbar. Demnach kann dieser Aspekt bei der Emissionsberechnung berücksichtigt werden.

Die LTO-Phase setzt sich allgemein aus dem Leerlauf, die Taxi-Verkehre am Boden, der Startphase bis 914 m und der Landephase ab 914 m zusammen, wobei sich insbesondere die Taxi-Verkehre von Flughafen zu Flughäfen stark unterscheiden können. Für jeden Flugzeugtyp können somit in Abhängigkeit der Dauer des Taxi-Verkehrs der Verbrauch bzw. die Emissionen ermittelt werden.

Die LTO-Berechnung erfolgt analog zum Guidebook 2016 der Methodik der ICAO (exemplarisch für den Verbrauch) über folgende Gleichung:

$$V_{LTO} \left[\frac{kg}{Start} \right] = 42[s] \cdot v_{100\% Last} \left[\frac{kg}{s} \right] + 132[s] \cdot v_{85\% Last} \left[\frac{kg}{s} \right] + 240[s] \cdot v_{30\% Last} \left[\frac{kg}{s} \right] + Taxizeit[s] \cdot v_{7\% Last} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Die für die jeweiligen Lastzustände spezifischen Verbräuche und Emissionen können dabei direkt der Turbinendatenbank entnommen werden. Die Anzahl der Starts differenziert nach

Flugzeugtyp ist über die Sonderabfrage von Destatis gegeben. Somit ist es möglich, spezifische Emissionen für die ausgewählten deutschen Flughäfen anzugeben. Für die sonstigen Flughäfen und den nicht gewerblichen Flugverkehr wird die durchschnittliche Taxizeit Deutschlands (2018: 1.015 Sekunden) angesetzt. Da hier entsprechende Eingangswerte fehlen, wird für die Jahre vor 2005 der flughafenspezifische Mittelwert der Folgejahre angesetzt. Rund 72 % der definierten Flugzeugtypen sind über die Turbinendatenbank abgedeckt. Die restlichen Typen erhalten die LTO-Werte vergleichbarer Flugzeugtypen.

D.4 Überarbeitung des Flugverkehrs auf sonstigen Flugplätzen und des nicht gewerblichen Flugverkehrs

Für den Flugverkehr auf sonstigen Flugplätzen (Abfertigung von weniger als 150.000 Passagiereinheiten) und den nicht gewerblichen Flugverkehr stehen keine Informationen zu Flugdistanzen und verwendeten Flugzeugtypen zur Verfügung. Es liegt lediglich die Anzahl der Starts differenziert nach MTOW vor. Bis zur vorliegenden Aktualisierung wurden pauschale Werte pro Start angesetzt, die über den Zeitraum konstant blieben. Durch die Aktualisierung wird der sonstige Flugverkehr (sonstige Flugplätze und nicht gewerblicher Verkehr) gänzlich angepasst.

Die verwendeten Flugzeugtypen und Distanzen des sonstigen Flugverkehrs werden nun anhand der Flugbewegungen auf den ausgewählten Flughäfen abgeleitet. Hierbei dient das MTOW als Entscheidungsgröße. Die Anzahl der Starts auf den sonstigen Flugplätzen ist bspw. in der Differenzierung MTOW <2t, 2-5,7t, 5,7-14t, 14-20t, >20t, Hubschrauber und Luftschiffe gegeben. In der neuen Methode wird überprüft, welche Flugzeugtypen auf den ausgewählten Flughäfen in den jeweiligen Größenklassen am häufigsten starten. Im nächsten Schritt wird unterstellt, dass anteilig dieselben Flugzeugtypen auch auf den sonstigen Flugplätzen und im nicht gewerblichen Verkehr zum Einsatz kommen. Anhand der durchschnittlichen Flugdistanz und Verkehrsleistung der jeweiligen Flugzeugtypen werden die jeweiligen Kenngrößen für den sonstigen Flugverkehr abgeleitet. Dieses Vorgehen erfolgt jahresfein.

Folgendes Beispiel soll das Vorgehen erläutern: Auf den sonstigen Flugplätzen gab es im Jahr 2018 57.856 Starts von Flugzeugen der Größe 2-5,7t. Auf den ausgewählten Flugplätzen wurden die Flugzeugtypen aus Tabelle 133 am meisten eingesetzt, wobei die Anzahl der verwendeten Flugzeugtypen beschränkt wird (hier acht).

Tabelle 133: Anzahl Starts, durchschnittliche Flugdistanzen und Passagierzahlen pro Start für Flugzeugtypen der Größenklasse 2-5,7t auf den ausgewählten Flughäfen im Jahr 2018

Flugzeugtyp	Starts national	Starts international	Flugdistanz national	Flugdistanz international	Passagiere national	Passagiere international
2	7.432	1.696	261	716	0,9	1,7
3	447	75	265	606	1,0	1,5
6	664	483	288	673	1,1	1,2
7	488	/	200	/	2,6	/
8	363	/	123	/	0,3	/
245	3.042	2.194	291	702	1,1	2,0
246	/	134	/	1.106	/	2,5
247	/	254	/	727	/	1,8

Anmerkung: die Anzahl der berücksichtigten Flugzeugtypen wird für jede Größenklasse für die Relationen (national/international) jeweils auf maximal sechs beschränkt. Quelle: eigene Auswertung anhand von Statistiken von Destatis

Aus den relativen Anteilen der Starts auf den ausgewählten Flughäfen ergeben sich die relativen Anteile für die sonstigen Flugplätze. Unter Berücksichtigung der Anzahl Starts in der jeweiligen Größenklasse auf den sonstigen Flugplätzen ergeben sich die absoluten Starts. Durchschnittliche Flugdistanz und Passagierzahl pro Start werden für die sonstigen Flugplätze übernommen. Tabelle 134 fasst die Zahlen für den sonstigen Flugverkehr in der Größenklasse 2-5,7t für das Jahr 2018 zusammen. Die Verkehrsleistung im Güterverkehr auf den sonstigen Flugplätzen wird vernachlässigt. Die Berechnung für die anderen Größenklassen sowie den nicht gewerblichen Flugverkehr erfolgt analog. Anzumerken ist, dass der sonstige Flugverkehr – trotz der hier hoch erscheinenden Flugzeugkilometer – weder einen nennenswerten Anteil an der Betriebs- und Verkehrsleistung noch am gesamten Energiebedarf aufweist. Jedoch hat der sonstige Flugverkehr (nicht gewerblicher Verkehr und sonstige Flugplätze) einen großen Anteil am gesamten Flugbenzinverbrauch. Dieser liegt bei 90 %.

Tabelle 134: Anzahl Starts, gesamte Flugzeugkilometer und Verkehrsleistung (PV) für Flugzeugtypen der Größenklasse 2-5,7t auf den sonstigen Flughäfen im Jahr 2018

Flugzeugtyp	Starts national	Starts international	Flugzeug-km national	Flugzeug-km international	VL [Pkm] national	VL [Pkm] international
2	24.895	5.681	6.497.595	4.067.596	5.847.836	6.914.913
3	1.497	251	396.705	152.106	396.705	228.159
6	2.224	1.618	640.512	1.088.914	704.563	1.306.697
7	1.635	0	327.000	0	850.200	0
8	1.216	0	149.568	0	44.870	0
245	10.190	7.349	2.965.290	5.158.998	3.261.819	10.317.996
246	0	449	0	496.594	/	1.241.485
247	0	851	0	618.677	/	1.113.619
Gesamt:	57.856 Starts		22.559.555 km		32.228.862 Pkm	

Quelle: eigene Auswertung anhand von Statistiken von Destatis

E Aktualisierung der Methodik für die Binnenschifffahrt

E.1 Spezifischer Energiebedarf

Die spezifischen Energiebedarfswerte für Binnenschiffe basierten bisher auf einer Auswertung zahlreicher Literaturdaten, mit deren Hilfe generische Energiebedarfskurven pro Schiffstyp, Gewässertyp, Tragfähigkeit, Fahrtrichtung und Beladungsgrad abgeleitet wurden (Knörr et al. 2013). Diese werden nun mithilfe von Verbrauchsmessungen im realen Betrieb für vier Güterschiffe auf dem Rhein im Rahmen des EU-Forschungsprojekt PROMINENT (van Mensch et al. 2018) angepasst.

Hierbei zeigte sich, dass sowohl der durchschnittliche Lastfaktor der Motoren als auch der spezifische Kraftstoffverbrauch geringer ist als bisher in TREMOD-NA angenommen wurde. Allerdings ist die zugrundeliegende Stichprobe mit vier Schiffen klein und erlaubt keine Differenzierung in Leer- und Lastfahrten. Der Beladungsgrad wurde in PROMINENT-Studie pauschal mit 70% angesetzt. Die bisherigen Auswertungen der Binnenschifffahrtsstatistik des statistischen Bundesamtes und verschiedenen Schleusenzählungen für TREMOD-NA legen jedoch nahe, dass dieser Wert im Durchschnitt nur für beladene Schiffe repräsentativ ist, und unter Berücksichtigung der zusätzlichen Leerfahrten eher von einem mittleren Beladungsgrad von ca. 50% auszugehen ist (Heidt et al. 2016). Jedoch liegen selbst die für einen Beladungsgrad von 50% berechneten Werte höher als die Ergebnisse der PROMINENT Studie (siehe Tabelle 135).

Tabelle 135: Vergleich des spezifischen Dieseler Verbrauchs für Güterschiffe auf dem Rhein im Jahr 2017 im Projekt Prominent und TREMOD-NA

Tragfähigkeit	3200 t	4000 t	5200 t	5600 t
Dieseler Verbrauch zu Berg (kg/km)				
TREMOD_bisher	15,3	17,8	20,7	21,5
TREMOD_neu	15,0	17,4	20,0	20,6
PROMINENT	15,0	15,0	16,0	20,0
Dieseler Verbrauch zu Tal (kg/km)				
TREMOD_bisher	7,6	8,8	10,3	10,6
TREMOD_neu	6,0	7,0	8,1	8,3
PROMINENT	5,0	4,0	6,0	8,0

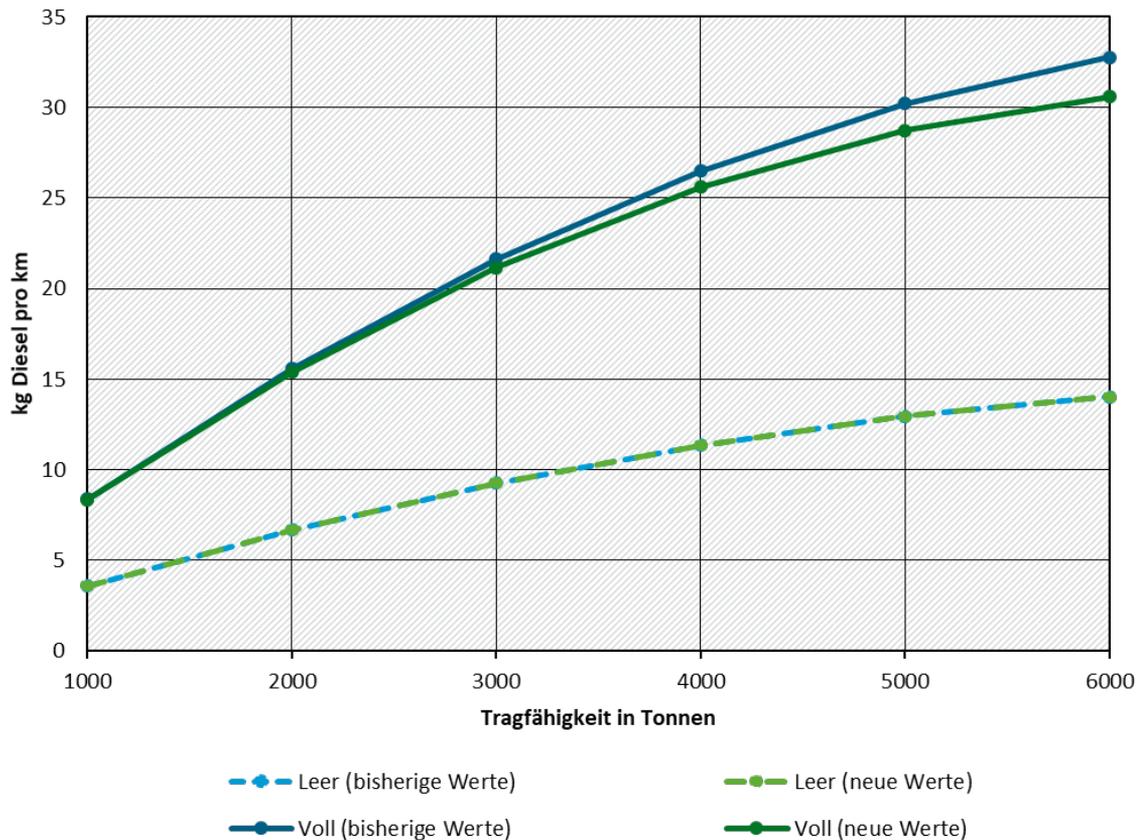
Quelle: PROMINENT (van Mensch et al. 2018) und eigene Auswertungen. Anmerkung: Für die TREMOD-Werte wird ein Beladungsgrad von 50% angenommen, bei PROMINENT wird 70% angegeben.

Auch die bisherigen Auswertungen in (Knörr et al. 2013) und (Heidt et al. 2016) zeigten, dass einzelne Quellen zwar deutlich niedrigere spezifische Energiebedarfswerte angeben, die TREMOD-NA-Werte jedoch in der Regel innerhalb der aufgezeigten Bandbreiten liegen. Aufgrund der zahlreichen Einflussparameter, insbesondere der Fahrgeschwindigkeit sowie den Strömungs- und Gewässerabmessungen (Tiefe und Breite), lassen sich solche Unterschiede schwer nachvollziehen. Jedoch zeigte ein Abgleich des mittleren spezifischen Verbrauchs der Gesamtflotte, welcher sich aus Kraftstoffabsatzstatistiken des CDNI-Abkommens rückrechnen

ließ und zwischen 2011 und 2013 bei 0,38 bzw. 0,34 MJ/tkm lag, gute Übereinstimmungen mit dem mittleren Verbrauch von ca. 0,35 bis 0,36 MJ/tkm in TREMOD (Heidt et al. 2016)².

Daher wird der spezifische Energiebedarf für Motorfrachtschiffe (darunter Gütermotor-, Tankmotor- und Containerschiffe) nur leicht reduziert (siehe Abbildung 21 und Abbildung 22). Aufgrund der hohen Unterschiede zu den Daten im PROMINENT Projekt sollten die Energiebedarfswerte beim Vorliegen weiterer Daten umfangreicher geprüft werden, um die Ursachen für die Unterschiede herauszufinden.

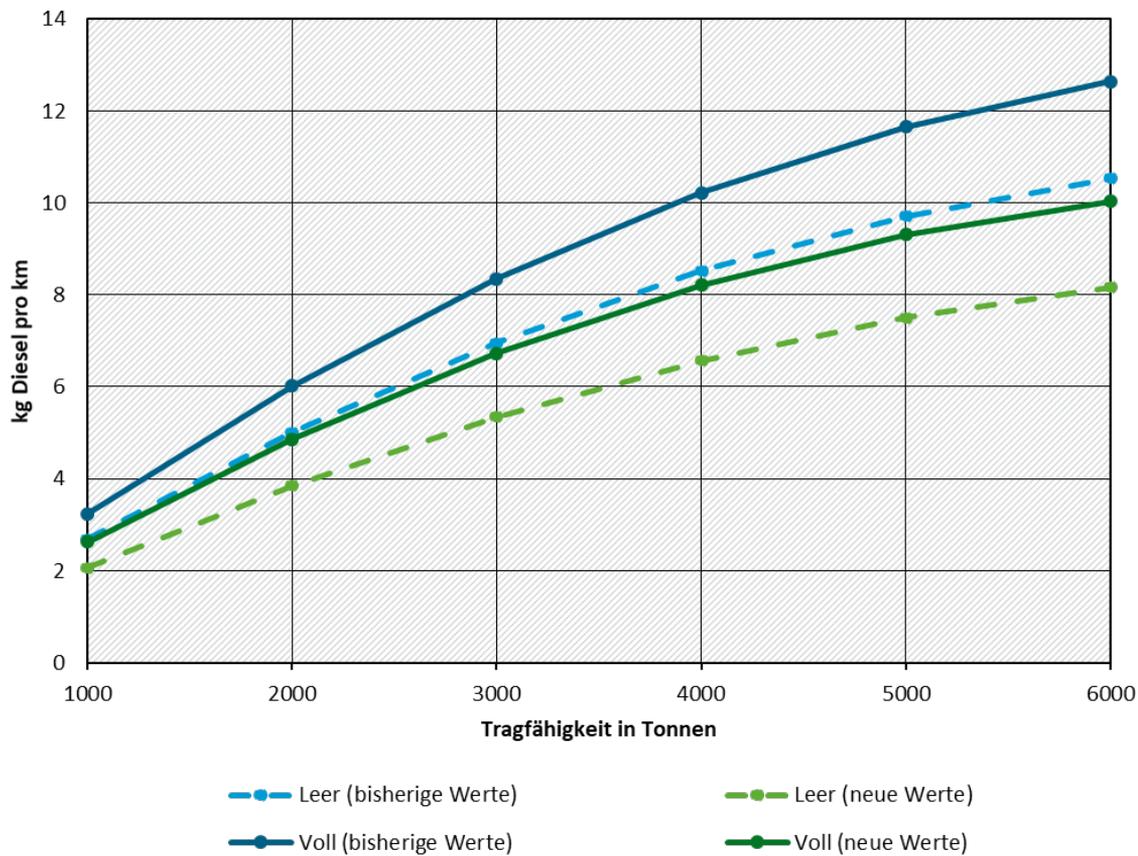
Abbildung 21: Spezifischer Energiebedarf von Frachtschiffen auf freifließenden Gewässern zu Berg



Quelle: eigene Berechnungen

² Der Vergleich mit der deutschen Energiebilanz zeigt zwar deutlich stärkerer Abweichungen, wonach die getankten Dieselmengen geringer als die berechneten Energiebedarfe liegen. Allerdings ist dieser Vergleich aufgrund des hohen Aufkommens von internationalen Verkehren und damit der Wahrscheinlichkeit des Tankens im Ausland mit Unsicherheiten behaftet.

Abbildung 22: Spezifischer Energiebedarf von Frachtschiffen auf freifließenden Gewässern zu Tal



Quelle: eigene Berechnungen

Da die Anpassung auf neueren Messdaten beruht und die niedrigen Lastfaktoren eher aktuellen Entwicklungen zugeordnet werden (vgl. nächstes Kapitel), werden die gezeigten Regressionsfunktionen für den spezifischen Energiebedarf der Antriebsmotoren von Güterschiffen im Bezugsjahr 2010 angewendet. Die Verbrauchswerte zwischen 2000 und 2010 wurden entsprechend neu interpoliert. Ab 2010 werden jährliche Effizienzverbesserungen analog zu (Heidt et al. 2016) angenommen, welche auch im Trendszenario fortgeschrieben werden.

Wie in den vorherigen Dokumentationen zu TREMOD-NA beschrieben, werden der in den Funktionen dargestellte spezifische Energiebedarf noch um einen pauschalen Aufschlag um 5% für Hilfsaggregate bzw. Aufenthalte in Häfen und Schleusen ergänzt.

E.2 Spezifische Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren für Binnenschiffsmotoren für PM, NO_x, CO und HC wurden als Mittelwerte für konkrete Baujahrreihen bzw. Emissionsstandards sowohl aus Literaturdaten als auch diversen Messdaten ermittelt, siehe (Knörr et al. 2013). Die insbesondere für neuere Motoren zu Verfügung stehenden Messdaten lagen jedoch nur für den im Rahmen der Typgenehmigung erforderlichen Prüfzyklus E2 und E3 nach ISO 8178/4 für den Generator- und Propellerbetrieb vor. Gemittelt über den gesamten Messzyklus liegt die Motorlast hiermit bei ca. 69 % der Nennleistung. Hingegen zeigen neuere Analysen des PROMINENT Projekts (van Mensch et al. 2018) und des niederländischen Emissionsinventars (Ligterink et al. 2019), dass der mittlere Lastfaktor für Binnenschiffsmotoren in der Realität mit ca. 35% deutlich niedriger liegt. (Ligterink et al. 2019) schätzen dies als aktuelle Entwicklung ein, welche nach dem Jahr 2008 infolge von Überkapazitäten der Binnenschifffahrt und Sparmaßnahmen zum Fahren mit geringerer Geschwindigkeit auftrat.

Für die spezifischen Emissionsfaktoren ist der Lastzustand des Motors sehr relevant, da dieser u.a. die Abgastemperatur und damit die Schadstoffbildung bzw. bei neueren Motoren die Abgasnachbehandlung beeinflusst. Zur Berücksichtigung dieser Effekte werden in (Ligterink et al. 2019) lastspezifische Korrekturfaktoren für die Emissionsfaktoren in Abhängigkeit der Schadstoffkomponente und des Motorbaujahrs verwendet. Diese Vorgehensweise ist auch für die Berechnung von Emissionen mobiler Maschinen, z.B. Baumaschinen, etabliert (Helms / Heidt 2014). Daher wurden mittlere Korrekturfaktoren für die Emissionsfaktoren in TREMOD-NA ermittelt, welche in Tabelle 136 dargestellt sind. Die Lastkorrektur bewirkt somit insbesondere bei den CO, HC und NO_x-Emissionen eine deutliche Erhöhung, wobei sich diese bei NO_x vor allem bei der seit 2019 eingeführten Stufe EU V bemerkbar macht. Dadurch verringern sich die NO_x-Emissionen gegenüber der letzten Stufe EU IIIA zwar deutlich, aber nicht in dem Maße, wie es bei höherer Motorlast der Fall wäre.

Tabelle 136: Emissionsfaktoren für Binnenschiffsmotoren bei 35% der maximalen Motorlast

Baujahr/ Emissionsstandard	Korrekturfaktor zum Normzyklus				Neuer Emissionsfaktor in g/kWh			
	NO _x	PM	CO	HC	NO _x	PM	CO	HC
vor 1970	1,00	1,00	1,00	1,00	11,00	0,60	4,50	1,10
1970-1980	1,00	1,00	1,00	1,00	11,00	0,50	4,00	0,90
1980-1989	1,03	1,09	1,56	1,27	12,88	0,33	3,12	0,51
1990-2002	1,03	1,09	1,56	1,27	11,85	0,16	1,40	0,51
2003-2006 (ZKR I)	1,03	1,09	1,56	1,27	9,27	0,13	1,40	0,51
2007-2018 (ZKR II/ EU IIIA)	1,11	1,09	1,56	1,27	7,77	0,13	1,09	0,38
2019+ (EU V) <300 kW	1,50	1,09	1,56	1,27	3,15	0,11	1,09	0,38
2019+ (EU V) >=300 kW	1,63	1,09	1,56	1,27	2,93	0,02	1,09	0,24
2019+ (EU V) LNG	1,63	1,09	1,56	1,27	2,93	0,02	1,09	4,73

Bei dieser Vorgehensweise ist zu berücksichtigen, dass die angepassten Emissionsfaktoren nur ein näherungsweise genaues Ergebnis für die gesamte Flotte ergeben, da der Zusammenhang

zwischen Motorlast und Emissionen nicht linear ist. Eine anteilige Berücksichtigung verschiedener Lastzustände, wie in (Ligterink et al. 2019) verwendet, wäre daher geeigneter, war jedoch mangels verfügbarer Daten zu Lastzuständen nicht möglich.

Die dargestellten Emissionsfaktoren werden ab dem Bezugsjahr 2010 verwendet. Da nicht genau bekannt ist, welche mittleren Lastfaktoren in der Vergangenheit zutrafen, wurden die spezifischen Emissionsfaktoren zwischen 2000 und 2010 linear interpoliert. Bis zum Jahr 2000 werden die bisherigen Emissionsfaktoren beibehalten.

Ein weiterer entscheidender Schritt für die Emissionsberechnung in TREMOD-NA ist die Zuordnung der Emissionsfaktoren der verschiedenen Motorbaujahre zu den Verkehrsleistungen und dem Energieverbrauch der Binnenschiffsflotte. Hierfür wurden bisher Altersverteilungen der eingesetzten Motoren pro Tragfähigkeitsklasse für die niederländische und die deutsche Schiffsflotte ermittelt (Knörr et al. 2013). Zum Zeitpunkt der Aktualisierung konnten neuere Daten von der Zentralstelle Schiffsuntersuchungskommission/Schiffseichamt (ZSUK) für die deutsche Flotte bezogen werden, jedoch nicht für die niederländische Flotte. Auch war eine Aktualisierung der Altersverteilungen aus Zeitgründen nicht möglich, da dies eine genauere Überprüfung der verfügbaren Motorenzulassungsdaten, aber auch der Lebenszeiten und Absterbefunktionen im Flottenumschichtungsmodell für TREMOD-NA erfordert hätte. Die bisherigen Altersverteilungen wurden daher beibehalten. Diese sollten jedoch im Rahmen zukünftiger Aktualisierungen überprüft werden.

E.3 Auswirkungen der Aktualisierungen auf das Gesamtergebnis

Die Gesamtergebnisse, welche sich durch die Anpassungen des spezifischen Energieverbrauchs und der Emissionsfaktoren ergeben, sind in Tabelle 137 dargestellt. Bis zum Jahr 2000 treten keine Änderungen auf. Danach verringern sich der Endenergiebedarf und die CO₂-Emissionen je nach Bezugsjahr um bis zu 5% bzw. 6%, während sich die Schadstoffemissionen tendenziell gegenüber TREMOD 5.83 erhöhen. Die größten Unterschiede treten bei CO und NO_x auf, wobei letztere sich vor allem in zukünftigen Jahren durch die Anpassung der NO_x-Emissionsfaktoren für die Abgasstufe EU V bemerkbar machen. Da diese Anpassung auf heutigen Erkenntnissen beruht, sind die Annahmen bei zukünftigen Aktualisierungen zu überprüfen.

Tabelle 137: Gesamtergebnisse für die Binnenschifffahrt von 2000 bis 2050 und Darstellung der Änderungen

Komponente	Einheit	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Endenergiebedarf							
TREMOD 5.83	PJ	26,5	24,3	22,3	20,0	19,4	15,4
TREMOD 6.03	PJ	26,5	23,8	21,4	19,2	18,4	14,7
Änderung	%	0%	-2%	-4%	-4%	-5%	-5%
CO₂							
TREMOD 5.83	Gt	1.962	1.796	1.650	1.480	1.406	1.103
TREMOD 6.03	Gt	1.962	1.764	1.585	1.419	1.334	1.039
Änderung	%	0%	-2%	-4%	-4%	-5%	-6%
NO_x							

Komponente	Einheit	2000	2010	2020	2030	2040	2050
TREMOD 5.83	t	35.407	31.639	26.939	22.086	11.282	3.638
TREMOD 6.03	t	35.407	30.832	26.617	22.137	12.599	5.345
Änderung	%	0%	-3%	-1%	0%	12%	47%
PM							
TREMOD 5.83	t	1.208	911	686	530	269	67
TREMOD 6.03	t	1.208	936	687	534	273	70
Änderung	%	0%	3%	0%	1%	2%	4%
CO							
TREMOD 5.83	t	8.931	6.658	4.910	3.683	2.422	1.300
TREMOD 6.03	t	8.931	7.317	5.862	4.593	3.282	1.921
Änderung	%	0%	10%	19%	25%	35%	48%
HC							
TREMOD 5.83	t	2.111	1.660	1.315	1.036	1.312	1.366
TREMOD 6.03	t	2.111	1.791	1.510	1.195	1.381	1.378
Änderung	%	0%	8%	15%	15%	5%	1%