

TEXTE

126/2024

Aktualisierung TREMOD/TREMOD-MM und Ermittlung der Emissionsdaten des Verkehrs nach KSG im Jahr 2023

Endbericht

von:

Michel Allekotte, Kirsten Biemann, Marie Colson, Christoph Heidt, Jan Kräck, Wolfram Knörr
Ifeu Heidelberg

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 126/2024

Projektnummer 180968
FB001530

Aktualisierung TREMOD/TREMOD-MM und Ermittlung der Emissionsdaten des Verkehrs nach KSG im Jahr 2023

Endbericht

von

Michel Allekotte, Kirsten Biemann, Marie Colson, Christoph
Heidt, Jan Kräck, Wolfram Knörr
Ifeu 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

Durchführung der Studie:

Ifeu institut
Wilckensstraße 3
69121 Heidelberg

Abschlussdatum:

März 2024

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, September 2024

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

Kurzbeschreibung: Aktualisierung TREMOD/TREMOD-MM und Ermittlung der Emissionsdaten des Verkehrs nach KSG im Jahr 2023

Das Emissionsberechnungsmodell „TREMODO“ (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 das Emissionsinventar wurden die Bestands- und Fahr- und Verkehrsleistungsdaten bis zum Jahr 2022 fortgeschrieben. Für das Jahr 2023 wurden die „Vorläufigen Emissionsdaten des Vorjahres“ (VEdV 2023) nach KSG ermittelt. Anschließend wurde das Trendszenario bis zum Jahr 2050 aktualisiert.

Die aktuelle Fortschreibung der Basisdaten bis zum Jahr 2022 für die Emissionsberichterstattung im Nationalen Inventarbericht 2024 ist in der TREMOD-Version 6.51 vom 30.09.2023 enthalten. Die „Vorläufigen Emissionsdaten des Vorjahres“ (VEdV 2023) nach KSG ist in der TREMOD-Version 6.52 vom 15.03.2024 enthalten. Die Aktualisierung des Trendszenarios ist in der TREMOD-Version 6.53 vom 30.04.2024 enthalten.

Abstract: Update of the TREMOD/TREMOD-MM models for emissions reporting 2023

The emission calculation model "TREMODO" (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 the emissions inventory, the inventory and driving and transport performance data were updated up to 2022. For 2023, the "Preliminary emissions data of the previous year" (VEdV 2023) were determined in accordance with KSG. The trend scenario was then updated up to the year 2050.

The current update of the baseline data up to 2022 for emissions reporting in the National Inventory Report 2024 is contained in TREMOD version 6.51 dated 30 September 2023. The "Preliminary emissions data for the previous year" (VEdV 2023) in accordance with the KSG is contained in TREMOD version 6.52 dated 15 March 2024. The update of the trend scenario is contained in TREMOD version 6.53 dated 30 April 2024.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	11
Abkürzungsverzeichnis.....	16
Zusammenfassung.....	20
Summary.....	25
1 Grundlagen und Kennzahlen.....	30
1.1 Energetische Kennzahlen und Umrechnungsfaktoren.....	30
1.2 Treibhausgasemissionen.....	32
1.3 Schwefeldioxid- und Bleiemissionen.....	33
1.4 Emissionsfaktoren der Vorketten.....	34
1.4.1 Konventionelle Kraftstoffe.....	34
1.4.2 Strom.....	35
1.4.3 Biokraftstoffe.....	36
2 Aktualisierung der Zeitreihe 1990-2022.....	37
2.1 Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr.....	37
2.2 Straßenverkehr.....	38
2.2.1 Fahrzeugbestand.....	38
2.2.2 Fahrleistungen.....	44
2.2.2.1 Personenverkehr.....	44
2.2.2.2 Güterverkehr.....	46
2.2.2.3 Zeitreihe der Fahrleistungen 1990-2022.....	49
2.2.3 Energieverbrauch und Emissionsfaktoren.....	50
2.2.3.1 Emissionsfaktoren.....	50
2.2.3.2 Anpassung der Effizienzentwicklung bei Pkw, LNF, SNF und Bus.....	50
2.3 Schienenverkehr.....	52
2.3.1 Abgrenzung Schienenverkehr.....	52
2.3.2 Berechnungsmethodik.....	52
2.3.3 Verkehrs- und Betriebsleistungen.....	53
2.3.4 Energieverbrauch.....	55
2.3.5 Emissionsfaktoren.....	57
2.4 Binnenschifffahrt.....	58
2.4.1 Abgrenzung und Berechnungsmethodik Binnenschifffahrt.....	58
2.4.2 Verkehrs- und Fahrleistungen.....	58

2.4.3	Energieverbrauch.....	59
2.4.4	Emissionsfaktoren.....	60
2.5	Flugverkehr	61
2.5.1	Übersicht.....	61
2.5.2	Berechnungsmethodik.....	61
2.5.2.1	Bottom up Berechnung.....	61
2.5.2.2	Top-Down Abgleich für die Emissionsberichterstattung	63
2.5.3	Verkehrs- und Betriebsleistungen	64
2.5.4	Kraftstoffverbrauch.....	67
2.5.5	Schadstoffe	71
2.6	Energiebilanz.....	73
2.6.1	Revision der Energiebilanzen 2003-2021.....	73
2.6.2	Ergänzung der Biokraftstoffe und Fortschreibung bis 2022	75
2.6.3	Vergleich Kraftstoffabsatz mit dem Inlandsverbrauch	77
2.7	Ergebnisse	81
2.7.1	Energieverbrauch und Emissionen	81
2.7.1.1	Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs nach Energieträgern.....	81
2.7.1.2	Endenergieverbrauch aller Verkehrsträger	82
2.7.1.3	Direkte Abgasemissionen des Straßenverkehrs	84
2.7.1.4	Treibhausgasemissionen des Verkehrs nach Territorialprinzip.....	85
2.7.1.5	Treibhausgasemissionen des Verkehrs im nationalen Inventarbericht (NIR)	87
2.7.2	Ursachen für Änderungen gegenüber der Version 6.43.....	89
2.7.2.1	Fahrleistungen Straßenverkehr	89
2.7.2.2	Energieverbrauch Straßenverkehr.....	89
2.7.2.3	Stickstoffoxidemissionen	94
2.7.2.4	Abgas-Partikelemissionen.....	98
2.7.3	Vergleich der VEdV mit dem Inventar 2022	102
2.7.3.1	Entwicklung der Absatzzahlen und der Aufteilung in die Quellkategorien für das Jahr 2022.....	102
2.7.3.2	THG-Emissionen des Verkehrs 2022 in den VEdV und im Inventar.....	104
3	Vorläufige Emissionsdaten des Vorjahrs (VEdV 2023)	106
3.1	Mobile Quellen in den Kategorien Haushalte, Bauwirtschaft, Landwirtschaft, GHD und Militär.....	106
3.2	Flugverkehr	107
3.3	Nationaler Schiffsverkehr.....	108

3.4	Schienenverkehr	109
3.5	Straßenverkehr	110
3.5.1	Vorgehen.....	110
3.5.2	Neuzulassungen und Bestand.....	111
3.5.3	Effizienzentwicklung	112
3.5.4	Fahrleistungen	113
3.6	Ergebnisse der VEdV 2023	117
3.6.1	Energieverbrauch und THG-Emissionen nach Kategorien.....	117
3.6.2	Energieverbrauch und THG-Emissionen im Straßenverkehr	119
3.7	Ursachenanalyse	122
4	Aktualisierung des Trendszenarios bis 2050	125
4.1	Definition des Trendszenarios	125
4.2	Entwicklung der Verkehrsleistungen	126
4.3	Straßenverkehr	128
4.3.1	Annahmen zur Fahrleistungsentwicklung im Straßenverkehr.....	128
4.3.2	Entwicklung der Fahrzeugflotten.....	129
4.3.2.1	Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge	129
4.3.2.2	Schwere Nutzfahrzeuge und Busse	132
4.3.2.3	Motorisierte Zweiräder und sonstige Fahrzeugkategorien	135
4.3.3	Entwicklung der Energieeffizienz.....	136
4.3.3.1	Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge	136
4.3.3.2	Schwere Nutzfahrzeuge und Busse	140
4.3.3.3	Motorisierte Zweiräder und sonstige Fahrzeugkategorien	142
4.3.4	Entwicklung der spezifischen Emissionen.....	142
4.4	Schienenverkehr	142
4.4.1	Betriebsleistung und Auslastung	142
4.4.2	Entwicklung der Energieeffizienz.....	143
4.4.3	Entwicklung der spezifischen Emissionen.....	144
4.5	Binnenschifffahrt.....	144
4.5.1	Auslastung und zurückgelegte Schiffskilometer	145
4.5.2	Entwicklung der Energieeffizienz.....	145
4.5.3	Entwicklung der spezifischen Emissionen.....	145
4.6	Flugverkehr	146
4.6.1	Entwicklungen der Verkehrsleistung und Flugzeugkilometer	146

4.6.2	Entwicklungen der spezifischen Emissionen	148
4.7	Ergebnisse	149
4.7.1	Verkehrs- und Fahrleistungen.....	149
4.7.2	Energieverbrauch und Emissionen	152
4.7.2.1	Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs nach Energieträgern.....	152
4.7.2.2	Endenergieverbrauch aller Verkehrsträger	153
4.7.2.3	Direkte Abgasemissionen des Straßenverkehrs	154
4.7.2.4	Treibhausgasemissionen des Verkehrs nach Territorialprinzip.....	156
4.7.2.5	Treibhausgasemissionen des Verkehrs nach Bundesklimaschutzgesetz (KSG).....	157
5	Quellenverzeichnis	160
A	Fahrleistungen und Verkehrsleistungen des Busverkehrs	166
A.1	Vorbemerkungen	166
A.2	Fahrleistungen	166
A.3	Verkehrsleistungen	167
A.4	Beförderungsangebot und Auslastung	169
B	Erfüllung der gesetzlichen Biokraftstoffe Vorgaben zur THG-Minderung	171
B.1	Gesetzgebung.....	171
B.2	Biomassemix und Emissionsfaktoren.....	172
B.3	Anteile der Biokraftstoffe und synthetischen Kraftstoffe am Endenergieverbrauch	174
B.4	Erfüllung der Vorschriften.....	175
C	Zusatzinformationen	177
C.1	Heizwerte und Absatzmengen	177

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung der Gesamtemissionen bis 2022 und im Trendszenario bis 2050 nach KSG.....	24
Figure 2:	Greenhouse gas emissions from transport in Germany - development of total emissions until 2022 and in the trend scenario until 2050 according to KSG.....	29
Abbildung 3:	Vergleich des in TREMOD ermittelten Kerosinverbrauchs im Flugverkehr (auf HVF) mit Angaben von Fluggesellschaften für das Jahr 2022.....	63
Abbildung 4:	Vergleich der Anteile des Kerosinverbrauchs des nationalen Flugverkehrs am Gesamtkerosinverbrauch nach TREMOD und Eurocontrol.....	64
Abbildung 5:	Entwicklung der Starts, Flugzeugkilometer und Verkehrsleistungen des Flugverkehrs in Deutschland 1990- 2022.....	67
Abbildung 6:	Jährlicher Energiebedarf (Flugbenzin und Kerosin) des Flugverkehrs in Deutschland nach TREMOD, Eurocontrol und Energiebilanz.....	68
Abbildung 7:	Energiebedarf (Flugbenzin und Kerosin) für den nationalen, internationalen und gesamten Flugverkehr.....	69
Abbildung 8:	Anteil der LTO-Phase am Kraftstoffverbrauch.....	70
Abbildung 9:	Kraftstoffverbrauch pro Personenkilometer im nationalen und internationalen Flugverkehr.....	71
Abbildung 10:	NO _x -, CO-, HC- und PM-Emissionen des Flugverkehrs auf den ausgewählten Flughäfen 1990-2022.....	72
Abbildung 11:	NO _x -Emission des gewerblichen Flugverkehrs in der LTO-Phase im Jahr 2022 differenziert nach Flughäfen [t/a].....	73
Abbildung 12:	Energieverbrauch des Straßenverkehrs in Deutschland nach Energieträgern - Entwicklung des Endenergieverbrauchs bis 2022.....	82
Abbildung 13:	Energieverbrauch des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung des Endenergieverbrauchs bis 2022.....	83
Abbildung 14:	Stickstoffoxidemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen bis 2022.....	84
Abbildung 15:	Abgaspartikelemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen bis 2022.....	85
Abbildung 16:	Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung der Gesamtemissionen bis 2022.....	86
Abbildung 17:	Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung bis 2022 in der Abgrenzung der Emissionsberichterstattung.....	88
Abbildung 18:	Ergebnisse Dekomposition MIV, LNF, SNF 2023/2022.....	123

Abbildung 19:	Ergebnisse Dekomposition MIV, LNF, SNF 2023/2019.....	124
Abbildung 20:	Verkehrsleistungen des Personenverkehrs in Deutschland nach Verkehrsträgern von 1990 bis 2022 und im Trendszenario bis 2050.....	150
Abbildung 21:	Verkehrsleistungen des Güterverkehrs in Deutschland nach Verkehrsträgern von 1990 bis 2022 und im Trendszenario bis 2050.....	151
Abbildung 22:	Fahrleistungen des Straßenverkehrs in Deutschland nach Verkehrsarten und Antrieben von 1990 bis 2022 und im Trendszenario bis 2050.....	152
Abbildung 23:	Energieverbrauch des Straßenverkehrs in Deutschland nach Energieträgern - Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Trendszenario bis 2050.....	153
Abbildung 24:	Energieverbrauch des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Trendszenario bis 2050.....	154
Abbildung 25:	Stickstoffoxidemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen im Trendszenario bis 2050.....	155
Abbildung 26:	Abgaspartikelemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen im Trendszenario bis 2050.....	156
Abbildung 27:	Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung der Gesamtemissionen im Trendszenario bis 2050.....	157
Abbildung 28:	Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung im Trendszenario bis 2050 in der Abgrenzung des Bundesklimaschutzgesetzes (KSG)	159

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Dichte für Kraftstoffe (in kg/l)	30
Tabelle 2:	Heizwerte für Kraftstoffe (in MJ/kg).....	30
Tabelle 3:	Kennzahlen der Zertifizierungskraftstoffe im HBEFA	32
Tabelle 4:	Direkte CO ₂ -Emissionsfaktoren für Kraftstoffe und Gase	32
Tabelle 5:	Direkte Blei- und SO ₂ -Emissionsfaktoren für Kraftstoffe und Gase im Verkehr	33
Tabelle 6:	THG- Emissionsfaktoren konventioneller Kraftstoffe in g CO _{2e} /MJ (nur Vorkette)	35
Tabelle 7:	Anteil Energieträger im Strommix und CO _{2e} -Emissionsfaktoren inkl. Vorkette im TREMOD-Trendszenario	36
Tabelle 8:	Verkehrsleistungsentwicklung 2010-2022	37
Tabelle 9:	Berücksichtigte Antriebsarten pro Fahrzeugkategorie bis zum Bezugsjahr 2022	38

Tabelle 10:	Entwicklung des Pkw-Bestands nach Antriebsart 2000-2022 ..39
Tabelle 11:	Entwicklung des LNF-Bestands von 2000-2022 nach Antriebsart40
Tabelle 12:	Entwicklung des SNF-Bestands nach Antrieben 2000-2022.....41
Tabelle 13:	Entwicklung des Busbestands von 2000-2022 insgesamt und Anteil der Linienbusse nach Antriebsart42
Tabelle 14:	Entwicklung des KR-, KKR- und Pedelec-Bestands nach Antrieben 2000-2022.....43
Tabelle 15:	Jährliche Änderungsrate der DTV laut Verkehrsbarometer44
Tabelle 16:	Fahrleistungen des MIV in TREMOD 2019-202245
Tabelle 17:	Busfahrleistung in TREMOD46
Tabelle 18:	Änderung der Fahrleistung auf Autobahn laut Mautstatistik ..46
Tabelle 19:	Anteil an der Güterverkehrsfahrleistung je Fahrzeugkategorie ab 2019 laut Verkehrsbarometer47
Tabelle 20:	Wachstumsrate der Fahrleistung bzw. der DTV auf Autobahnen und Bundesstraßen laut Mautstatistik und Verkehrsbarometer47
Tabelle 21:	Fahrleistung des Güterverkehrs 2019-202248
Tabelle 22:	Fahrleistung in Deutschland nach Fahrzeugkategorien 1990- 202249
Tabelle 23:	CO ₂ -Emissionen aus der Typzulassung (NEFZ) und abgeleitete reale CO ₂ -Emissionen der Pkw-Neuzulassungen in Deutschland 2011 bis 202251
Tabelle 24:	CO ₂ -Emissionen aus der Typzulassung (NEFZ) und abgeleitete reale CO ₂ -Emissionen der LNF-Neuzulassungen in Deutschland 2011 bis 202251
Tabelle 25:	Verkehrsleistungsentwicklung des Personenverkehrs der Eisenbahnen in Deutschland 1994-202253
Tabelle 26:	Verkehrsleistungsentwicklung des Güterverkehrs der Eisenbahnen in Deutschland 1994-202254
Tabelle 27:	Berechneter Dieserverbrauch der Eisenbahnen in Deutschland im Vergleich mit der Energiebilanz 1994-202256
Tabelle 28:	Emissionsfaktoren des dieselbetriebenen Schienenverkehrs für ausgewählte Jahre57
Tabelle 29:	Verkehrs- und Fahrleistung der Binnenschifffahrt 1995-2022.58
Tabelle 30:	Verkehrsleistung und Energieverbrauch der Binnenschifffahrt 1995-2022.....59
Tabelle 31:	Mittlere Emissionsfaktoren der Binnenschifffahrt (in g/kg) für ausgewählte Jahre60
Tabelle 32:	Gewerbl. Flugverkehr auf den Hauptverkehrsflughäfen 1990- 2022 (nat. + internat.)65
Tabelle 33:	Gewerblicher nationaler Flugverkehr auf den Hauptverkehrsflughäfen 1990-202265

Tabelle 34:	Unterschied der revidierten Energiebilanzen 2003-2021 zu den bisherigen Werten	74
Tabelle 35:	Kraftstoffabsatz in Deutschland nach Energiebilanz 1990-2022	75
Tabelle 36:	Vergleich Verbrauch im Inland und Absatz für Benzin und Diesel im Straßenverkehr 1990-2022	78
Tabelle 37:	Anpassungsfaktoren Kraftstoffabsatz Energiebilanz / Inlandsverbrauch TREMOD 1990-2022	80
Tabelle 38:	Vergleich der TREMOD-Version 6.51 gegenüber TREMOD 6.43 – Fahrleistungen	89
Tabelle 39:	Vergleich der TREMOD-Version 6.51 gegenüber TREMOD 6.43 – spezifischer Energieverbrauch.....	90
Tabelle 40:	TREMOD-Version 6.51 – gesamter Energieverbrauch Inland ..	90
Tabelle 41:	Vergleich der TREMOD-Version 6.51 gegenüber TREMOD 6.43 – Energieverbrauch Inland	91
Tabelle 42:	TREMOD-Version 6.51 – gesamter Energieverbrauch Absatz..	92
Tabelle 43:	Vergleich der TREMOD-Version 6.51 gegenüber TREMOD 6.43 – Energieverbrauch Absatz.....	93
Tabelle 44:	TREMOD-Version 6.51 – NO _x -Emissionsfaktoren.....	94
Tabelle 45:	Vergleich der TREMOD-Version 6.51 gegenüber TREMOD 6.43 – spezifische NO _x -Emissionsfaktoren	95
Tabelle 46:	TREMOD-Version 6.51 – NO _x -Emissionen des Straßenverkehrs im Inland	96
Tabelle 47:	Vergleich der TREMOD-Version 6.51 gegenüber TREMOD 6.43 –NO _x -Emissionen des Straßenverkehrs im Inland.....	97
Tabelle 48:	TREMOD-Version 6.51 – Abgas-Partikel-Emissionsfaktoren (in g/km)	98
Tabelle 49:	Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 – spezifische Abgas-Partikel-Emissionsfaktoren	99
Tabelle 50:	TREMOD-Version 6.51 –Abgas-Partikel-Emissionen des Straßenverkehrs im Inland	100
Tabelle 51:	Vergleich der TREMOD-Version 6.51 gegenüber TREMOD 6.43 –Abgas-Partikel-Emissionen des Straßenverkehrs im Inland ..	101
Tabelle 52:	Dieselmotorkraftstoffabsatz im Jahr 2022 nach Kategorien in den VEdV und im Inventar ohne Bioanteile (physikalische Einheiten)	102
Tabelle 53:	Ottomotorkraftstoffabsatz im Jahr 2022 nach Quellkategorien in den VEdV und im Inventar ohne Bioanteile (physikalische Einheiten)	103
Tabelle 54:	Ottomotorkraftstoffabsatz im Jahr 2022 nach Quellkategorien in den VEdV und im Inventar ohne Bioanteile (natürliche Einheiten)	103

Tabelle 55:	Absatz Biokraftstoffe im Jahr 2022 nach Quellkategorien (VEdV und Inventar).....	104
Tabelle 56:	THG-Emissionen des Verkehrs 2022 in den VEdV und im Inventar	105
Tabelle 57:	Statistische Kenndaten zur Entwicklung der Kategorien Bau-, Land- und Forstwirtschaft	106
Tabelle 58:	Starts, Flugzeug-km und Verkehrsleistung des gewerblichen Flugverkehrs auf den Hauptverkehrsflughäfen 2022 und 2023	108
Tabelle 59:	Verkehrsleistungsentwicklung im Eisenbahnverkehr 2022-2023	110
Tabelle 60:	Anzahl der Neuzulassungen im Jahr 2023.....	111
Tabelle 61:	Berechnete Fahrzeugbestände 2023 im Vergleich zu 2022 jeweils als Jahresmittelwert nach Antriebsart	111
Tabelle 62:	Entwicklung der mittleren CO ₂ -Emissionen von Neufahrzeugen in g/km für Pkw im WLTP	112
Tabelle 63:	Entwicklung der mittleren CO ₂ -Emissionen von Neufahrzeugen in g/km für LNF im WLTP	112
Tabelle 64:	Fahrleistungen auf Autobahnen und Bundesstraßen 2022 und 2023 in der Mautstatistik	113
Tabelle 65:	Wachstumsrate der Fahrleistung bzw. der DTV auf Autobahnen und Bundesstraßen laut Mautstatistik und Verkehrsbarometer 2022-2023.....	114
Tabelle 66:	Jährliche Änderungsrate 2022-2023 im Verkehrsbarometer.....	115
Tabelle 67:	Ergebnisse der Fahrleistungen je Fahrzeugkategorie für die Jahre 2022-2023	116
Tabelle 68:	Energieverbrauch 2023 in PJ gemäß AMS und Aufteilung auf einzelne Quellkategorien.....	118
Tabelle 69:	Treibhausgasemissionen des Verkehrs 2023 in MT CO _{2eq}	119
Tabelle 70:	Endenergieverbrauch im Straßenverkehr nach Energieträgern	119
Tabelle 71:	Endenergieverbrauch im Straßenverkehrs nach Fahrzeugarten	120
Tabelle 72:	THG-Emissionen des Straßenverkehrs nach Fahrzeugarten ..	120
Tabelle 73:	Inlandsfahrleistung-basierter Energieverbrauch im Straßenverkehr nach Energieträgern	121
Tabelle 74:	Inlandsfahrleistungs-basierter Energieverbrauch im Straßenverkehr nach Fahrzeugarten.....	121
Tabelle 75:	Sozio-ökonomische Randbedingungen für das TREMOD-Trendszenario	126
Tabelle 76:	Verkehrsleistungsentwicklung 2019-2050	127
Tabelle 77:	Entwicklung der Fahrleistungen 2019-2050.....	128

Tabelle 78:	Anteil der Neuzulassungen der Pkw im Trendszenario nach Antriebsart.....	129
Tabelle 79:	Entwicklung der Pkw-Bestände im Trendszenario bis 2050...	130
Tabelle 80:	Anteil der Neuzulassungen der LNF im Trendszenario nach Antriebsart.....	131
Tabelle 81:	Entwicklung der LNF-Bestände im Trendszenario bis 2050 ...	132
Tabelle 82:	Anteil der Neuzulassungen der SNF im Trendszenario nach Antriebsart.....	133
Tabelle 83:	Anteil der Neuzulassungen der Linien- und Reisebusse im Trendszenario nach Antriebsart	135
Tabelle 84:	Anteil der Neuzulassungen motorisierter Zweiräder im Trendszenario nach Antriebsart	136
Tabelle 85:	CO ₂ -Emissionen nach NEFZ/WLTP und Hybridanteile für Otto- und Diesel-Pkw 2005-2035	137
Tabelle 86:	CO ₂ -Flottengrenzwert für Pkw nach WLTP 2021-2035	137
Tabelle 87:	Reale CO ₂ -Emissionen und Stromverbrauch bei Pkw-Neuzulassungen im Szenario	138
Tabelle 88:	CO ₂ -Emissionen nach NEFZ/WLTP und Hybridanteile für Otto- und Diesel-LNF 2015-2035	139
Tabelle 89:	CO ₂ -Flottengrenzwert für LNF nach WLTP 2021-2035	139
Tabelle 90:	Reale CO ₂ -Emissionen und Stromverbrauch bei LNF-Neuzulassungen im Szenario	140
Tabelle 91:	Anteil von Nullemissions-Lkw und Reduktion des Kraftstoffverbrauchs für Verbrenner-Lkw im Jahr 2030 nach verschiedenen Szenarien.....	141
Tabelle 92:	Reduktion der spezifischen CO ₂ -Emissionen bei SNF im Trendszenario	141
Tabelle 93:	Reduktion der spezifischen CO ₂ -Emissionen bei Bussen im Trendszenario	142
Tabelle 94:	Entwicklung der Auslastungsgrade im Güter-, Personenfern- und Personennahverkehr	143
Tabelle 95:	Entwicklung des Dieselanteils an den Betriebsleistungen im Güter-, Personenfern- und Personennahverkehr	143
Tabelle 96:	Emissionsgrenzwerte Schienenverkehr (g/kWh)	144
Tabelle 97:	Mittlere Emissionsfaktoren der Binnenschifffahrt (in g/kg Dieselkraftstoff) im Trendszenario	146
Tabelle 98:	Anzahl Starts.....	146
Tabelle 99:	Änderungen des Aufkommens und der mittleren Flugweite pro Flug ggü. 2019.....	147
Tabelle 100:	Verkehrsleistungen (Personen und Güter) des gesamten Flugverkehrs im Szenario.....	148
Tabelle 101:	Fahrleistungen des Busverkehrs 2019-2022 im Inland in TREMOD	166

Tabelle 102:	Fahrleistungen des Busverkehrs von Destatis 2019 bis 2022 im Inland und Ausland.....	167
Tabelle 103:	Verkehrsleistungen des Busverkehrs 2019 bis 2022 im Inland und Ausland.....	168
Tabelle 104:	Auslastung des Busverkehrs 2019 bis 2022 im Inland und Ausland.....	168
Tabelle 105:	Verkehrsleistungen des Busverkehrs 2019 bis 2022 im Inland in TREMOD.....	168
Tabelle 106:	Beförderungsangebot des Busverkehrs 2019 bis 2022 im Inland und Ausland.....	169
Tabelle 107:	Auslastung des Busverkehrs 2019 bis 2022 im Inland und Ausland.....	170
Tabelle 108:	Geltendes Regulatorium des Bundesimmissionsschutzgesetzes für das TREMOD Trendszenario.....	171
Tabelle 109:	Biomasse (Anteile gerundet) der Biokraftstoffe im Trendszenario.....	172
Tabelle 110:	THG-Emissionsfaktoren (g CO ₂ eq/MJ) der Biokraftstoffe und Biomasse im Trendszenario.....	173
Tabelle 111:	Anteile Biokraftstoffe und PtX im Trendszenario.....	175
Tabelle 112:	Anteil der Biomassenmixkategorien nach THG-Quote des TREMOD Trendszenarios.....	175
Tabelle 113:	Ergebnisse der THG-Quote im TREMOD-Trendszenario.....	176
Tabelle 114:	Heizwerte für die Umrechnung der masse-bezogenen Energiemengen der AMS in physikalische Mengen (2023)....	177
Tabelle 115:	Inlandsablieferungen der Kraftstoffe der VEdV 2023.....	177

Abkürzungsverzeichnis

AO	Außerorts
BAB	Bundesautobahnen
BADA	Base of Aircraft Data (Datenbasis für Luftfahrzeuge)
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BAZL	Bundesamt für Zivilluftfahrt der Schweiz
Bbl	Volumeneinheit verwendet für Erdölprodukte (entspricht 159 Liter)
BEMU	Battery Electric Multiple Unit: Batterieelektrische Züge
BEV	Battery-electric vehicle
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
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
CBM	Compressed Bio Methane
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
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
DISI	Direct Injection Spark Ignition
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DLR	Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrt
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
EEA	European Environmental Agency (deutsch: „Europäische Umweltagentur“)
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
ETS	EU-Emissionshandel (European Emission Trading System)
FC_MJ	Energieverbrauch in MJ
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FLBus	Fernlinienbus
FLE 2014	Fahrleistungserhebung 2014
FOCA	Federal Office of Civil Aviation (Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL)
FzKat	Fahrzeugkategorie
ggü.	gegenüber
HB	Halterbefragung: Inländerfahrleistung der Fahrleistungserhebung
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs
HC	Kohlenwasserstoffe
HEMU	Hydrogen Electric Multiple Unit: Wasserstoff-Brennstoffzellen-Züge
HVF	Hauptverkehrsflughafen
ICAO	International Civil Aviation Organization (Internationale Zivilluftfahrtorganisation)
inkl.	inklusive
insb.	insbesondere
IO	Innerorts

KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KBA-ViK	Verkehr in Kilometer (KBA)
Kfz	Kraftfahrzeug
KKR	Kleinkrafträder
KR	Krafträder
KSG	Bundesklimaschutzgesetz
LBus	Linienbus
LNG	Liquefied Natural Gas
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge <=3,5t zGG
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)
Lz	Lastzug
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MTOW	Maximum Take Off Weight (Höchstabfluggewicht)
MZR	Motorisierte Zweiräder
NE	Nichtbundeseigene Eisenbahnen
NIR	National Inventory Report
N₂O	Diestickstoffoxid
NH₃	Ammoniak
NO_x	Stickstoffoxid
ÖSPV	Öffentlicher Straßenpersonenverkehr
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PJ	Petajoule
PM	Partikel (PM10)
PN	Partikelanzahl
PtX	Power to X: Strombasierte Kraftstoffe
Rbus	Reisebus
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge >3,5t zGG
SRBus	Sonstiger Reisebus
SVZ	Manuelle Straßenverkehrszählung der BAST
Sz	Sattelzug
TTW	Tank to Wheel: Antrieb
TREMOD	Transport Emission Model
UBA	Umweltbundesamt
UeKfzl	Übrige Kraftfahrzeuge <=3,5t zGG
UeKfzs	Übrige Kraftfahrzeuge >3,5t zGG
UER	Upstream Emission Reduction

v. H.	Von Hundert
VE-BFS	Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen: Auswertung der automatische Zählstellen für die BAST
VEdV	Vorläufige Emissionsdaten des Vorjahres nach KSG
VIZ	Verkehr in Zahlen
VZ	Verkehrszählung: Inlandsfahrleistung der Fahrleistungserhebung 2014
WTT	Well-to-Wheel: Energiebereitstellung
ZEV/ZLEV	Zero Emission Vehicle / Zero and Low Emission Vehicles (ZLEV) (siehe EU CO2-Flottenzielwertgesetzgebung für Pkw, LNF und SNF)
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht

Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorhabens wurden die aktuellen Daten zur Berechnung der Emissionen des Verkehrs bis zum Bezugsjahr 2022 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 2022 neu berechnet.

Für das Jahr 2023 wurden anschließend die „Vorläufigen Emissionsdaten des Vorjahres“ (VEdV 2023) nach KSG ermittelt. Am 15. März 2024 mussten dafür vom Umweltbundesamt die Treibhausgasemissionen des Jahres 2023 für alle Sektoren berichtet werden. Die Treibhausgasemissionen des Verkehrs basieren im Wesentlichen auf der vorläufigen Amtlichen Mineralölstatistik (AMS). Sie werden mit TREMOD mit Hilfe der vorliegenden Bestands- und Aktivitätsdaten des Vorjahres weiter differenziert, so dass belastbare Aussagen zu den Ursachen der Entwicklung der THG-Emissionen gegenüber dem Vorjahr möglich sind.

Danach wurde das Trendszenario bis 2050 an die aktuellen Entwicklungen angepasst. Das beinhaltet Änderungen in den gesetzlichen und fiskalischen Vorgaben, die Berücksichtigung aktueller Trends bei der Flottenentwicklung, insbesondere die Anteile der Antriebsarten, der Effizienzentwicklung und der Entwicklung der Verkehrsaktivitäten (Fahr- und Verkehrsleistungen).

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 2022 (Bestand zum 1.1.2023 und Neuzulassungen im Jahr 2022) wurden für TREMOD aufbereitet.

Bei den meisten Fahrzeugkategorien stieg der Bestand weiter an. Gleichzeitig nahm der Anteil der Elektrofahrzeuge zu. So ist bei den Pkw der Bestand an batterieelektrischen und Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen gegenüber 2021 um fast 75 % angestiegen.

Aktualisierung der durchschnittlichen CO₂-Emissionen neu zugelassener Pkw und leichter Nutzfahrzeuge auf Basis der Daten des KBA

Die spezifischen Kraftstoffverbräuche für Pkw und LNF wurden auf Basis des CO₂-Monitorings des KBA bis 2022 fortgeschrieben. Gegenüber 2021 hat sich der Flottenwert der neuen Diesel-Pkw nur leicht verbessert, dagegen ist der Verbrauch der neuen Benzin-Pkw leicht angestiegen. Die Verringerung der mittleren CO₂-Emissionen der Neuzulassungen insgesamt resultiert im Wesentlichen aus dem zunehmenden Anteil an elektrischen Antrieben.

Aktualisierung der Fahrleistungen

Die Fahrleistungen wurden vor allem auf Basis des Verkehrsbarometers der BAST und der Mautstatistik bis 2022 aktualisiert. Gegenüber 2022 sind Fahrleistungen der Pkw und Busse leicht angestiegen, bei den Lkw zurückgegangen.

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 (Bestand, Fahrleistung und spezifischer Verbrauch von elektrischen Fahrzeugen, Anteil von Fahrzeugen mit SCR-Systemen) wurden aktualisiert und die Ergebnisse bis 2022 fortgeschrieben.

Gegenüber 2021 hat sich der Stromverbrauch des Straßenverkehrs aufgrund der zunehmenden Fahrzeuge mit Elektroantrieb nahezu verdoppelt. Der AdBlue-Verbrauch hat sich leicht erhöht.

Aktualisierung Schienenverkehr

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

Die baureihenspezifischen Emissionsfaktoren der Dieseltraktion werden von der DB AG zur Verfügung gestellt. Diese wurden aufbereitet und in die entsprechenden TREMOD-Tabellen eingespielt. Bei allen in TREMOD bilanzierten Emissionskomponenten gab es 2022 einen Rückgang der mittleren Emissionsfaktoren des Personennah- und Fernverkehrs, des Güterverkehrs und der Rangierleistungen gegenüber 2021.

Aktualisierung der Verkehrs- und Betriebsleistungen der Bahnen

Die Verkehrsdaten wurden bis zum Jahr 2022 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 werden diese Daten von der DB zur Verfügung gestellt.

Zur Aktualisierung der Verkehrsdaten der übrigen Bahnen bis 2022 wurde im Wesentlichen auf die VDV-Statistik, die Bahnstatistik des statistischen Bundesamtes und Fahrplandaten zurückgegriffen. Die spezifischen Energie- und Emissionsfaktoren wurden mit den entsprechenden Kennzahlen der DG AG abgeglichen und im Rahmen der Gesamtbetrachtung des Eisenbahnverkehrs plausibilisiert.

Nach dem pademiebedingten Rückgang in den Vorjahren stieg die Verkehrsleistung im Personenverkehr im Jahr 2022 gegenüber 2021 wieder deutlich an (+60 %). Beim Güterverkehr gab es einen leichten Anstieg der Verkehrsleistung (+1,2 %).

Aktualisierung Binnenschifffahrt

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 2022 wurde eine Datenanfrage an das statistische Bundesamt gestellt und die Daten aus der Sonderauswertung für TREMOD aufbereitet. Bei der Binnenschifffahrt kam es 2022 zu einem Rückgang der Verkehrsleistung gegenüber 2021 (-9 %).

Aktualisierung Flugverkehr

In der diesjährigen Aktualisierung wurden die Aktivitätsdaten des Jahres 2022 integriert. Außerdem wurden einige neue Flugzeugtypen ergänzt. Die Verkehrsleistungen stiegen 2022 wieder deutlich an.

Revision der Energiebilanzen 2003-2021

Die Energiebilanz ist die Basis der Emissionsberichterstattung 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.

Zum 31.03.2023 wurden die Energiebilanzen der Jahre 2003 bis 2021 revidiert. Die revidierten Bilanzen enthalten Änderungen bei den für den Verkehr relevanten Energieträgern sowohl in der Gesamtsumme für den Endenergieverbrauch als auch in der Aufteilung auf die Sektoren. So gibt es für den Verkehr Abweichungen beim Dieserverbrauch zwischen +4,1 % und -6,1 %, beim Benzin von +7,1% bis -3,4%. Der Verbrauch einzelner Sektoren mit geringem Anteil am Gesamtverbrauch hat sich z.T. sehr stark geändert, z. B. Dieselmotorkraftstoff in der Binnenschifffahrt. Große Änderungen gab es auch beim Benzinverbrauch von Haushalten, Gewerbe und Handel. Einzelne Energieträger finden sich nun in Sektoren, in denen sie bisher nicht ausgewiesen waren, z.B. LPG und Ottokraftstoff in der Binnenschifffahrt.

Die revidierten Energiebilanzen wurden in TREMOD übernommen und führen zu Veränderungen der Ergebnisse für die Emissionsberichterstattung in der gesamten Zeitreihe 2003 bis 2021.

Vorläufige Emissionsdaten des Vorjahres (VEdV 2023)

Die Entwicklung der THG-Emissionen des Verkehrs wird geprägt von der Zunahme der Verkehrsleistungen im Personenverkehr und einem Rückgang der Verkehrsleistungen im Güterverkehr. Diese Entwicklungen gleichen sich nahezu aus. Durch die zunehmende Elektrifizierung im Straßenverkehr, Effizienzverbesserungen und die Zunahme des Anteils der Biokraftstoffe wurde dennoch eine Minderung der THG-Emissionen um fast 2 Mio. t CO₂eq gegenüber 2022 im Verkehr erreicht.

Aktualisierung Trendszenario

Das Szenario baut, wie auch im Vorjahr, auf den Ergebnissen der „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2022“ des BMDV auf, da aktuellere Prognosen noch nicht vorlagen. Dies betrifft vor allem die Entwicklung der sozio-ökonomischen Rahmenbedingung sowie die Entwicklung der Verkehrs- und Betriebsleistungen.

Das Szenario berücksichtigt bis 2030 alle Maßnahmen des „Klimaschutzprogramm 2030“. Außerdem sind aktuelle Grenzwertverordnungen der EU berücksichtigt, z. B.:

- ▶ CO₂-Grenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bis 2030 (EU 2019a) bzw. die Änderungsverordnung für die CO₂-Grenzwerte bis 2035 und danach (EU 2023a)
- ▶ CO₂-Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge bis 2030 (EU 2019b)
- ▶ Die revidierte Eurovignetten-Richtlinie zur Ausgestaltung der Lkw-Maut (EU 2022a)
- ▶ Erneuerbare-Energien-Richtlinie bis 2030 (EU 2018) und das Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasreduzierungs-Quote (Bundesanzeiger 2021)

Dementsprechend wurden die Annahmen zur Entwicklung der Fahrzeugflotten (v.a. Elektrifizierung), Entwicklung der Fahrzeugeffizienz überarbeitet.

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:

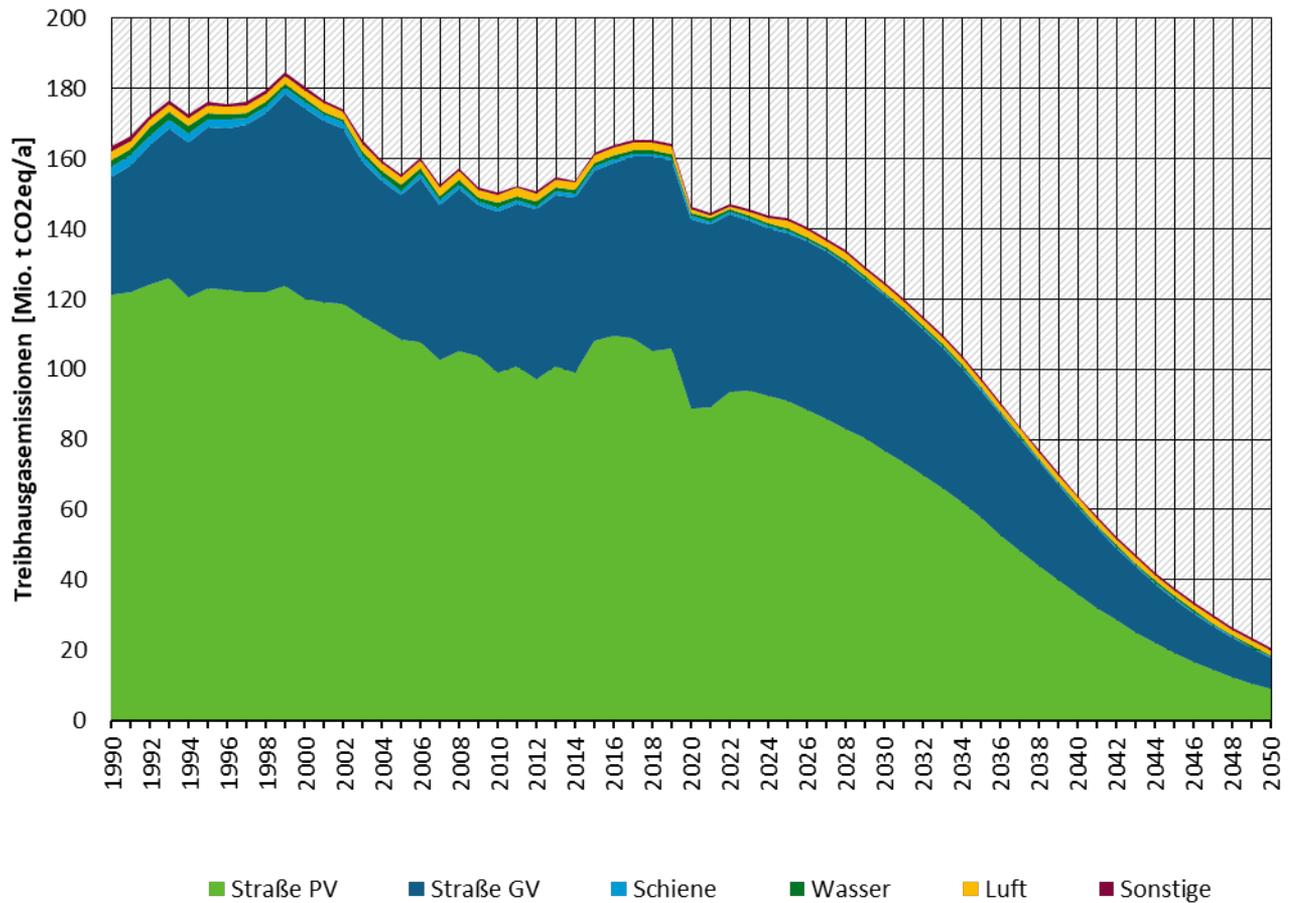
- ▶ Aktualisierung der Kraftstoffverbrauchsdaten für alle Verkehrsträger anhand der Energiebilanzen und der Statistiken des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)
- ▶ Aktualisierung der Biokraftstoffmengen und Anteile je Verkehrsmittel (auch im Szenario)
- ▶ Überführung sämtlicher aktualisierter 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
- ▶ Übergabe der Daten für die Emissionsberichterstattung an das UBA mittels ZSE-Schnittstelle.

Ergebnisse

Mit den aktualisierten Daten und Annahmen im Trendszenario erfolgt beim Straßengüterverkehr eine schnellere Durchdringung der Fahrzeugflotten mit Elektrofahrzeugen als bisher. Die Annahmen führen insgesamt zu einer stärkeren Absenkung aller Emissionen als in der vorigen Version. Allerdings zeigt sich, dass insbesondere die Klimaschutzziele gemäß KSG nicht erreicht werden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs in der Abgrenzung des KSG. Nach den Ergebnissen des Trendszenarios ist bis 2024 mit einem weiteren Anstieg der THG-Emissionen zu rechnen. Nach den bereits festgestellten Überschreitungen der Sektorziele nach KSG im Jahr 2021 und 2022 bedeutet dies, dass die Ziele ab 2023 voraussichtlich noch deutlicher überschritten werden. Im Trendszenario wird etwa für das Jahr 2030 eine Überschreitung von 47 % berechnet. Ebenso wenig werden die für das Jahr 2045 angestrebten Nullemissionen erreicht.

Abbildung 1: Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung der Gesamtemissionen bis 2022 und im Trendszenario bis 2050 nach KSG



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 (Inländische Seeschifffahrt, Festbrennstoffe im Schienenverkehr, Schmier- und Motoröl im Straßenverkehr).

Quellen: TREMOD 6.53 vom 30.04.2024; Emissionsübersichten nach Sektoren des Bundesklimaschutzgesetzes 1990 - 2023; Stand: 15.03.2024; ab 2024 Trendszenario

Summary

Within the framework of the current project, the current data for the calculation of transport emissions up to the reference year 2022 were included in the TREMOD model. The emissions of greenhouse gases and air pollutants calculated with the support 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 integrated into TREMOD and TREMOD-MM. The consumption and emission time series up to 2022 were then recalculated. Furthermore, the trend scenario was updated.

The "Preliminary emissions data for the previous year" (VEdV 2023) were then determined for 2023 in accordance with the KSG. On 15 March 2024, the Federal Environment Agency had to report the greenhouse gas emissions for 2023 for all sectors. The greenhouse gas emissions from transport are essentially based on the provisional official mineral oil statistics (AMS). They are further differentiated with TREMOD using the available inventory and activity data from the previous year, so that reliable statements can be made on the causes of the development of GHG emissions compared to the previous year.

The trend scenario was then adapted to current developments up to 2050. This includes changes in the legal and fiscal requirements, the consideration of current trends in fleet development, in particular the shares of drive types, the development of efficiency and the development of transport activities (driving and transport performance).

This report describes the work on 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 Federal Transport Authority (KBA) as a special evaluation. The data for the year 2022 (stock on 1.1.2023 and new registrations in 2021/2) have been prepared for TREMOD.

For most vehicle categories, the stock continued to increase. At the same time, the share of electric vehicles increased. In passenger cars, for example, the number of battery-electric and plug-in hybrid cars has risen by almost 75 % compared to 2021.

Update of average CO₂ emissions of newly registered passenger cars and light commercial vehicles based on KBA data

The specific fuel consumption of road vehicles for TREMOD was updated to 2022 on the basis of the KBA's CO₂ monitoring. Compared to 2021, the fleet value of new diesel passenger cars has improved only slightly, whereas the consumption of new petrol passenger cars has increased slightly. The reduction in the average CO₂ emissions of new registrations overall is mainly due to the increasing share of electric drives.

Updating of the mileage data

The mileage was updated primarily on the basis of the BASt mileage data on national mileage (traffic barometer) and the toll statistics up to 2022. Compared to 2021, the mileage of passenger cars and buses has risen slightly, while HGV mileage has fallen.

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 (vehicle stock, mileage and specific consumption of electric vehicles, for AdBlue the proportion of vehicles with SCR systems) were updated and the results updated until 2022.

Compared to 2021, the electricity consumption of road transport has more than doubled due to the increasing number of vehicles with electric drives. AdBlue consumption has increased again slightly.

Rail transport update

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

The specific emission factors are provided by German Railways (DB AG). These have been prepared and imported into the corresponding TREMOD tables. For all emission components balanced in TREMOD, there was a decrease in the average emission factors of local and long-distance passenger transport, freight transport and shunting services in 2022 compared to 2021.

Updating the transport and operating services of Railways

Traffic data have been updated up to 2022. Various statistics (DESTATIS, Verkehr in Zahlen, DB AG, etc.) were used for this purpose. The following parameters are considered: Transport performance, operating performance and utilisation rates. For DB AG, they are derived from evaluations carried out by DB AG.

In order to update the traffic data of the other railways until 2022, the main sources used were the VDV statistics, the rail statistics of the Federal Statistical Office and time table data. The specific energy and emission factors were compared with the corresponding key figures of DB AG and checked for plausibility as part of the overall analysis of rail traffic.

Following the decline in previous years due to the pandemic, passenger transport performance rose again significantly in 2022 compared to 2021 (+60%). Freight transport saw a slight increase in transport performance (+1.2 %).

Updating inland navigation

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 query. For the update up to 2022, a data request was submitted to the Federal Statistical Office and the data from the special evaluation was processed for TREMOD. For inland navigation, there was a decrease in transport performance in 2022 compared to 2021 (-9 %).

Updating air traffic

In this year's update, the activity data of the year 2022. In addition, some new aircraft types were added. The decline in air traffic was particularly high due to the pandemic: traffic performance increased significantly again in 2022.

Revision of the energy balances 2003-2021

The energy balance is the basis for emissions reporting and is therefore also relevant for the calculation of emissions in TREMOD. The energy balance for fuels is based on the quantities sold in Germany in a given year.

The energy balances for the years 2003 to 2021 were revised as at 31 March 2023. The revised balances contain changes in the energy sources relevant to transport, both in the total sum for final energy consumption and in the breakdown by sector. For transport, for example, there are deviations in diesel consumption of between +4.1% and -6.1% and in petrol consumption of between +7.1% and -3.4%. The consumption of individual sectors with a small share of total consumption has changed very significantly in some cases, e. g. diesel fuel in inland waterway transport. There were also major changes in petrol consumption by households, trade and commerce. Individual energy sources are now found in sectors in which they were not previously reported, e. g. LPG and petrol in inland shipping.

The revised energy balances were adopted in TREMOD and lead to changes in the results for emissions reporting in the entire time series from 2003 to 2021.

Preliminary emissions data from the previous year (VEdV 2023)

The development of GHG emissions from transport is characterised by an increase in passenger transport services and a decrease in freight transport services. These developments almost balance each other out. Thanks to the increasing electrification of road transport, efficiency improvements and the increase in the share of biofuels, a reduction in GHG emissions of almost 2 million tonnes of CO₂eq was achieved in transport compared to 2022.

Updating trend scenario

As in the previous year, the scenario is based on the results of the BMDV's "Floating Long-Range Traffic Forecast 2022", as more up-to-date forecasts were not yet available. This mainly concerns the development of the socio-economic framework conditions and the development of transport and operational services.

Accordingly, the scenario takes into account all measures of the "Climate Protection Programme 2030" until 2030. In addition, current EU limit value regulations are taken into account, e.g.:

- ▶ CO₂ limits for passenger cars and light commercial vehicles until 2030
- ▶ CO₂ limits for heavy-duty vehicles until 2030
- ▶ Renewable Energies Directive until 2030
- ▶ Law on the further development of the greenhouse gas reduction quota

Accordingly, the assumptions on the development of vehicle fleets (especially electrification), development of vehicle efficiency were revised.

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

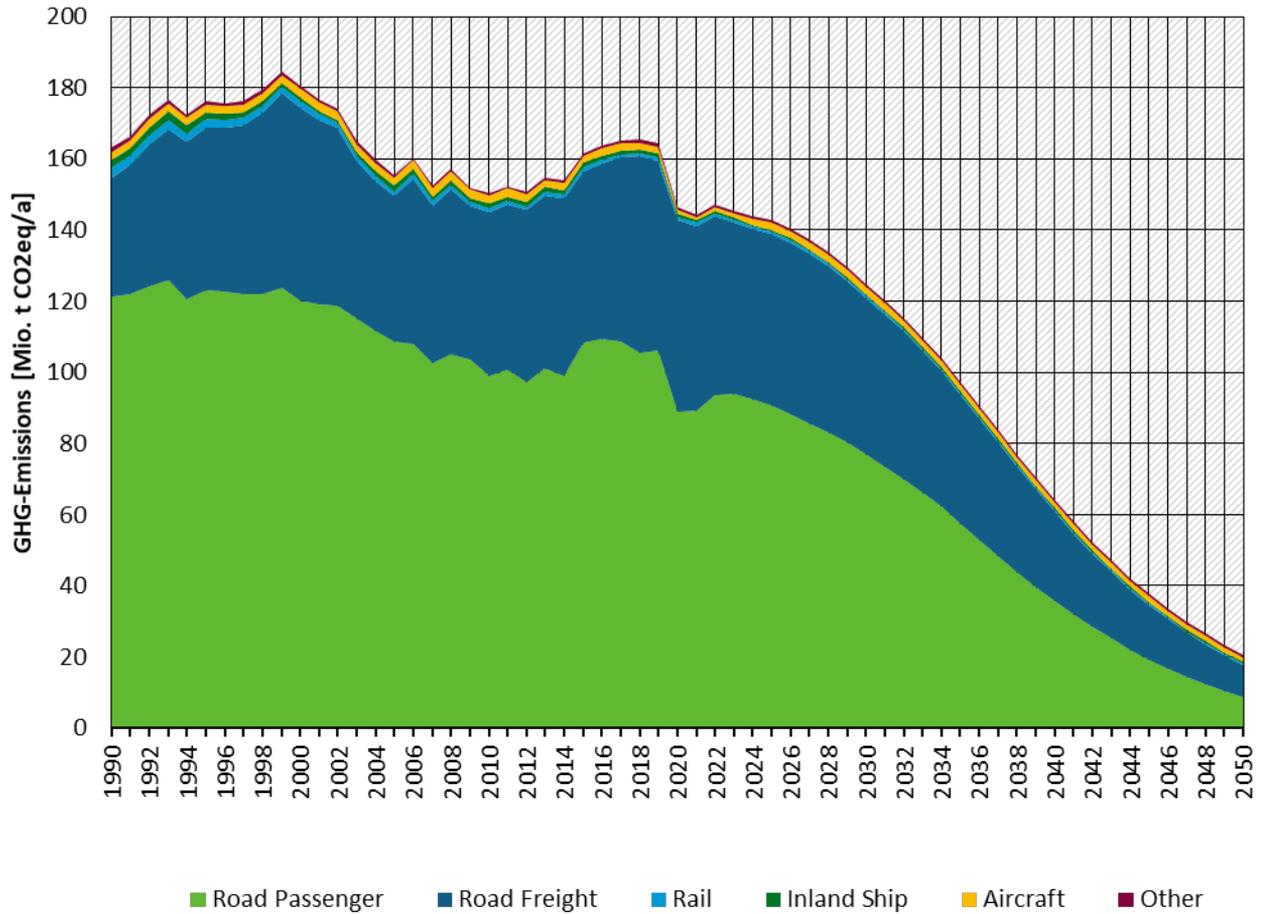
- ▶ Recalculation of consumption and emission time series 1990-2050
- ▶ Allocation of emissions related to fuel sales (according to energy balance) to determined domestic emissions
- ▶ Adaptation of the TREMOD-ZSE interface (Central Emissions System of the UBA)
- ▶ Transfer of data for emissions reporting to UBA via ZSE interface.

Results

With the updated data and assumptions in the trend scenario, there is a faster penetration of heavy duty vehicle fleets with electric vehicles than before. Overall, the assumptions lead to a stronger reduction of all emissions than in the previous version. However, it becomes apparent that the climate protection targets according to the KSG in particular will not be achieved.

The following figure shows the development of greenhouse gas emissions from transport as defined by the KSG. According to the results of the trend scenario, a further increase in GHG emissions is to be expected by 2024. After the already established exceedances of the sector targets according to KSG in 2021 and 2022, this means that the targets are expected to be exceeded even more significantly from 2023 onwards. In the trend scenario, an exceedance of 47 % is calculated for the year 2030. The zero emissions targeted for 2045 will also not be achieved.

Figure 2: Greenhouse gas emissions from transport in Germany - development of total emissions until 2022 and in the trend scenario until 2050 according to KSG



Notes: Direct emissions for road (road transport with motorised two-wheelers, passenger cars, light and heavy commercial vehicles and buses as defined in the energy balance), rail (railways as defined in the energy balance), water (freight transport with inland vessels as defined in the energy balance), air (domestic transport) and other (domestic maritime shipping, solid fuels in rail transport, lubricants and motor oil in road transport).

Sources: TREMOD 6.53 of 30.04.2024; emission overviews by sector of the Federal Climate Protection Act 1990 - 2023; as of 15.03.2024; from 2024 trend scenario.

1 Grundlagen und Kennzahlen

1.1 Energetische Kennzahlen und Umrechnungsfaktoren

Der Energieverbrauch wird in sehr unterschiedlichen Einheiten angegeben. Für flüssige und gasförmige Kraftstoffe sind volumenbezogene (Liter oder m³) oder massenbezogene (Gramm, Kilogramm oder Tonne) Einheiten üblich, bei elektrischem Strom sind es kWh. Die übliche Einheit, die den Energieinhalt der Energieträger berücksichtigt ist Joule, (kJ, MJ...). Alle massen- oder volumenbezogenen Einheiten lassen sich über ihre spezifische Dichte und den Heizwert in Joule umrechnen.

In TREMOD erfolgt die Bilanzierung des Energieverbrauchs auf Basis des Energieinhaltes in Joule (meist MJ). Die Umrechnung in kg oder Liter bei Kraftstoffen oder in kWh bei Strom wird mitgeführt, um eine Vergleichbarkeit mit anderen Quellen zu gewährleisten. Wesentliche Quelle für die Kennzahlen ist die AG Energiebilanzen (AG Energiebilanzen 2023). Sofern keine Werte seitens der AG Energiebilanzen vorliegen, werden andere Quellen verwendet.

Die spezifische Dichte wird bei allen Kraftstoffen für alle Jahre gleich angesetzt. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Dichte für Kraftstoffe (in kg/l)

Jahr	Benzin	Diesel	LPG	Bioethanol	Biodiesel	Erdgas/Biogas	Flugbenzin	Kerosin
Alle Jahre	0,742	0,832	0,600	0,79	0,879	*	0,742	0,8

*Dichte Erdgas: 0,716 kg/m³

Quellen: AG Energiebilanzen (Benzin, Diesel, Kerosin, LPG), BAFA (Biodiesel und Bioethanol)

Die Heizwerte werden von der AG Energiebilanzen für die meisten Kraftstoffe je Bezugsjahr angegeben. Die Werte für Benzin, Diesel und Kerosin wurden direkt in TREMOD übernommen. Für LPG, Flugbenzin, Bioethanol und Biodiesel wurden die Kennzahlen aus älteren Veröffentlichungen der AG Energiebilanzen übernommen und bisher nicht angepasst, um die Konsistenz mit den kraftstoffabhängigen Emissionsfaktoren zu gewährleisten. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Heizwerte für Kraftstoffe (in MJ/kg)

Jahr	Benzin	Diesel	Erdgas	LPG	Bioethanol	Biodiesel	Flugbenzin	Kerosin
1990	43,543	42,705	46,500	45,887	26,917	37,242	43,543	42,705
1991	43,543	42,705	46,500	45,887	26,917	37,242	43,543	42,705
1992	43,543	42,705	46,500	45,887	26,917	37,242	43,543	42,705
1993	43,543	42,960	46,500	45,987	26,917	37,242	43,543	43,000
1994	43,543	42,960	46,500	46,041	26,917	37,242	43,543	43,000
1995	43,543	42,960	46,500	46,028	26,917	37,242	43,543	43,000
1996	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	43,000
1997	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	43,000

Jahr	Benzin	Diesel	Erdgas	LPG	Bioethanol	Biodiesel	Flugbenzin	Kerosin
1998	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	43,000
1999	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	43,000
2000	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	43,000
2001	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	43,000
2002	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	43,000
2003	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	43,000
2004	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2005	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2006	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2007	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2008	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2009	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2010	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2011	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2012	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2013	43,543	42,960	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2014	43,543	42,649	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2015	43,543	42,694	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2016	43,543	42,648	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2017	43,543	42,648	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2018	43,543	42,648	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2019	43,543	42,648	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2020	43,543	42,648	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2021	43,543	42,648	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800
2022	43,543	42,648	46,500	46,598	26,917	37,242	43,543	42,800

Quellen: AG Energiebilanzen (Benzin, Diesel, Kerosin, LPG, Biodiesel und Bioethanol); 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 3: 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 (siehe nachfolgende Kapitel), die Verbrauchswerte in MJ auf Basis des Zertifizierungskraftstoffs mit den länderspezifischen Kennzahlen (Heizwert, Dichte, aber auch CO₂ und SO₂) verknüpft.

1.2 Treibhausgasemissionen

In TREMOD werden die CO₂-Emissionen sowie die Treibhausgasemissionen als CO₂-Äquivalente in der Gewichtung nach IPCC 2007 (CO₂=1, CH₄=25, N₂O=298) und IPCC AR5 (CO₂=1, CH₄=28, N₂O=265) angegeben. Für die Berichterstattung des UBA wird ab 2023 IPCC AR5 verwendet.

Für die Berechnung der direkten CO₂-Emissionen werden kraftstoffbezogene Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes, bezogen auf den Energieinhalt der Kraftstoffe, verwendet. Die direkten CO₂-Emissionsfaktoren für die Kraftstoffe und Gase wurden im Jahr 2023 vom Umweltbundesamt aktualisiert und gehen aus Tabelle 4 hervor.

Zusätzlich werden direkte Emissionen als „CO₂-fossil“ ausgewiesen. Hier sind bei den Emissionsfaktoren für Bioethanol und Biodiesel nur die fossilen Anteile berücksichtigt, wie sie auch in der Berichterstattung (NIR und VEdV) angesetzt werden. Dies sind 6,666% der direkten CO₂-Emissionen bei Bioethanol und 5,5 % bei Biodiesel. Für Biomethan werden derzeit noch keine fossilen CO₂-Anteile angesetzt, d. h. CO₂-fossil ist Null. Alle anderen Emissionsfaktoren von CO₂-fossil entsprechen den Werten in Tabelle 4.

Tabelle 4: Direkte CO₂-Emissionsfaktoren für Kraftstoffe und Gase

In kg/TJ

	Benzin	Diesel	Bioethanol	Biodiesel	Flüssiggas	Erdgas	Kerosin	Flugbenzin
1990	73.069	74.027			65.559		73.256	71.199
1991	73.061	74.027			65.557		73.256	71.199
1992	73.057	74.027			65.543		73.256	71.199
1993	73.056	74.027			65.368		73.256	71.199
1994	73.069	74.027			65.326		73.256	71.199
1995	73.075	74.027		70.800	65.334		73.256	71.199
1996	73.076	74.027		70.800	65.212		73.256	71.199
1997	73.073	74.027		70.800	65.205		73.256	71.199
1998	73.079	74.027		70.800	65.230		73.256	71.199
1999	73.086	74.027		70.800	64.041		73.256	71.199
2000	73.094	74.027		70.800	64.404	55.847	73.256	71.199

	Benzin	Diesel	Bioethanol	Biodiesel	Flüssiggas	Erdgas	Kerosin	Flugbenzin
2001	73.095	74.027		70.800	64.505	55.883	73.256	71.199
2002	73.095	74.027		70.800	64.376	55.892	73.256	71.199
2003	73.021	74.027		70.800	64.955	55.867	73.256	71.199
2004	72.950	74.027	71.607	70.800	65.262	55.858	73.256	71.199
2005	72.875	74.027	71.607	70.800	65.295	55.885	73.256	71.199
2006	72.877	74.027	71.607	70.800	65.361	55.869	73.256	71.199
2007	72.872	74.027	71.607	70.800	66.608	55.853	73.256	71.199
2008	72.824	74.027	71.607	70.800	65.225	55.868	73.256	71.199
2009	72.813	74.027	71.607	70.800	65.254	55.932	73.256	71.199
2010	72.810	74.027	71.607	70.800	65.330	55.928	73.256	71.199
2011	72.758	74.027	71.607	70.800	65.395	55.934	73.256	71.199
2012	72.822	74.027	71.607	70.800	65.399	55.917	73.256	71.199
2013	72.826	74.027	71.607	70.800	65.413	55.944	73.256	71.199
2014	72.827	74.027	71.607	70.800	65.461	55.936	73.256	71.199
2015	72.832	74.027	71.607	70.800	66.346	55.889	73.256	71.199
2016	72.827	74.027	71.607	70.800	66.334	55.840	73.256	71.199
2017	72.830	74.027	71.607	70.800	66.334	55.827	73.256	71.199
2018	72.828	74.027	71.607	70.800	66.334	55.718	73.256	71.199
2019	72.830	74.027	71.607	70.800	66.334	55.749	73.256	71.199
2020	72.779	74.027	71.607	70.800	66.334	55.826	73.256	71.199
2021	72.778	74.027	71.607	70.800	66.334	55.786	73.256	71.199
2022	72.787	74.027	71.607	70.800	66.334	56.221	73.256	71.199
2023	72.787	74.027	71.607	70.800	66.334	56.221	73.256	71.199

Anmerkungen: Erdgas: CNG, LNG und Biomethan

Quelle: Umweltbundesamt 2023

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 waren bei der Binnenschifffahrt schwefelarme Kraftstoffe vorgeschrieben.

Tabelle 5: Direkte Blei- und SO₂-Emissionsfaktoren für Kraftstoffe und Gase im Verkehr

In kg/TJ

Jahr	Benzin Blei	Benzin SO ₂	Diesel Straße und Bahn SO ₂	Diesel Binnenschifffahrt SO ₂
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
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; SO₂-Faktor Kerosin: 19,6 kg/TJ, alle für die gesamte Zeitreihe gültig

Quellen: Umweltbundesamt, eigene Annahmen

1.4 Emissionsfaktoren der Vorketten

1.4.1 Konventionelle Kraftstoffe

Relevante konventionelle Kraftstoffe für den Straßenverkehr sind vor allem Benzin, Diesel, CNG und LNG. Die Emissionsfaktoren für diese Kraftstoffe für die Jahre zwischen 2019 und 2020 wurden auf Grundlage der im Vorhaben „Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr (UAAK)“ (Biemann et al. 2024) ermittelten Daten abgeleitet und in TREMOD übernommen. Dabei wurden auch Emissionsfaktoren für die Luftschadstoffe, die nicht Bestandteil des genannten Vorhabens sind, abgeleitet. Da diese Faktoren jedoch neuere Erkenntnisse zu den erhöhten Methanemissionen aus der Erdöl- und Erdgasförderung noch nicht abbilden, wurde mit der aktuellen TREMOD Version 6.51 noch einmal eine Aktualisierung durchgeführt und für die Emissionsfaktoren ab 2021 angesetzt. In diesen Emissionsfaktoren sind jetzt die erhöhten Methanemissionen enthalten, so dass die Treibhausgasemissionen aus der Vorkette der konventionellen Kraftstoffe wie in Tabelle 6 gezeigt (weiter) ansteigen.

Tabelle 6: THG- Emissionsfaktoren konventioneller Kraftstoffe in g CO_{2e}/ MJ (nur Vorkette)

	Bis 2018	2019/ 2020	Ab 2021
Benzin	14,0	20,6	23,2
Diesel	15,6	20,3	23,4
CNG	13,6	19,1	20,3
LNG	21,5	23,3	25,0

Quelle: LBST, UAAK, eigene Berechnungen (ifeu)

Anmerkung: Aktuell wird in TREMOD nicht unterschieden zwischen CNG und LNG, daher werden die LNG-Vorketten nicht verwendet.

Die Emissionsfaktoren sind repräsentativ für Deutschland im Jahr 2021. Eine aktualisierte Zeitreihe für vergangene und zukünftige Jahre, die auf der gleichen Datengrundlage und Methodik beruht, liegt nicht vor. In der aktuellen TREMOD-Version 6.51 werden die neuen Daten ab dem Bezugsjahr 2021 eingesetzt und danach für alle zukünftigen Jahre beibehalten.

Auszug aus UAAK 2024 zu den erhöhten Methanemissionen aus Öl-/ Gasförderung

Früher wurden die Methanemissionen aus der Öl- und Gasförderung anhand der von den Unternehmen berichteten Emissionsmengen, welche aus dem regulären Betrieb der Erdöl- und Erdgasförderung stammen, berechnet (bottom-up). Neuere Erkenntnisse zeigen jedoch, dass die realen Methanemissionen damit deutlich unterschätzt werden, da es teilweise sehr hohe Methanemissionen aus dem irregulären Anlagenbetrieb gibt. Werden diese Methanemissionen somit top-down auf die Erdöl- und Erdgasförderung umgelegt, ergeben sich deutlich höhere Lasten. Durch den „IEA Methane Tracker“ der internationalen Energieagentur gibt es in der Zwischenzeit ein anerkanntes Vorgehen dazu, wie diese Emissionen auf die verschiedenen geförderten Produkte umgelegt und regionale Unterschiede abgebildet werden können. Seit 2022 enthält auch die international anerkannte Ökobilanzdatenbank ecoinvent Version 3.9.1 die erhöhten Methanemissionen aus der Öl- und Gasförderung.

Leider liegen für Kerosin und LPG bisher keine neueren Daten vor, so dass hier weiterhin die bis 2018 verwendeten Werte von LBST (Bergk et al. 2016) beibehalten werden. Dies führt dazu, dass TREMOD 6.51 aktuell die THG-Emissionsfaktoren dieser beiden Kraftstoffe deutlich unterschätzt. Speziell für Kerosin wäre es daher zu empfehlen, den THG-Emissionsfaktoren analog zu den im Straßenverkehr genutzten Kraftstoffen in der nächsten TREMOD Version anzupassen.

1.4.2 Strom

In TREMOD werden die Emissionsfaktoren für die Strombereitstellung des Umweltbundesamtes verwendet (Icha und Lauf 2023). Die aktuellen Werte bis 2022 werden übernommen, wobei die Werte für 2021 und 2022 noch als vorläufig bzw. geschätzt markiert sind.

Für die Ableitung zukünftiger Strommixe werden die Entwicklungen zur Stromerzeugung in Deutschland aus dem MMS-Szenario im Projektionsbericht 2024 (Mendelevitch et al. 2024) zugrunde gelegt. Die Emissionsfaktoren wurden aus brennstoffspezifischen Kennzahlen abgeleitet, die die gesamte Erzeugungskette beinhalten und kompatibel mit den UBA-Basiswerten bis 2022 sind. Da die verwendeten Tabellen aus dem Projektionsbericht die Annahmen zum Energieträgermix nur aggregiert enthalten, mussten Annahmen für die Anteile der sonstigen Energieträger sowie die Aufteilung der erneuerbaren Energie auf Wind, Wasser und Solar getroffen werden.

Tabelle 7: Anteil Energieträger im Strommix und CO_{2e}-Emissionsfaktoren inkl. Vorkette im TREMOD-Trendszenario

	2022	2025	2030	2035	2040	2050
Wasser	3%	3%	3%	2%	2%	2%
Wind	22%	37%	49%	60%	65%	64%
Solar	11%	16%	21%	26%	28%	27%
Kohle	31%	18%	0,3%			
Erdgas	14%	17%	15%	8%	5%	5%
Kernenergie	6%					
Sonstige (inkl. Biomasse)	14%	8%	12%	4%	1%	3%
CO _{2e} Emissionsfaktor (g/kWh)	498	371	172	106	76	80

Quelle: 2022: UBA (Icha und Lauf 2023); ab 2025 Projektionsbericht 2024 (Mendelevitch et al. 2024) und eigene Berechnungen

Aufgrund fehlender Daten wurde vereinfacht die relative Entwicklung der THG-Emissionen ab 2023 für alle anderen Emissionskomponenten übernommen.

1.4.3 Biokraftstoffe

Die Berechnung der Emissionen der Biokraftstoffe (v.a. Biodiesel, Bioethanol, Biomethan) basiert auf der aktuellen Zusammensetzung der Kraftstoffherkunft (feed stocks) nach Angaben der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Zum Zeitpunkt der Erstellung des Inventars in TREMOD 6.51 lagen die aktuellen Informationen des BLE noch nicht vor, so dass die Werte nicht angepasst wurden. Sie wurden erst im Trendszenario in TREMOD 6.53 angepasst und sind im Anhang B aufgeführt.

In Anhang B wird auch die Einhaltung der Mindestkriterien überprüft, die durch das Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminierungs-Quote (Bundesanzeiger 2021) vorgegeben sind. Da das Gesetz nicht nur Anforderungen an die Emissionsfaktoren der Kraftstoffe stellt sondern auch Mindestmengen an THG-reduzierten Kraftstoffen einschließlich Strom zur Erfüllung der vorgegeben Quoten erfordert, werden die Emissionsfaktoren im Kontext der gesamten THG-Bilanz der Kraftstoffe und die Randbedingungen zur Einhaltung des Gesetzes dargestellt.

2 Aktualisierung der Zeitreihe 1990-2022

2.1 Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr

Für die Aktualisierung der Verkehrsmengen bis 2022 lagen mit Stand 30. September 2023 folgende Daten vor, die für die Aktualisierung der Fahr- und Verkehrsleistungen bis 2022 verwendet wurden:

- ▶ Verkehr in Zahlen 2023/2024:
Verkehrsleistungen Straßengüterverkehr, Binnenschifffahrt, Eisenbahnverkehr, Öffentlicher Straßenpersonenverkehr (vorab von DLR zur Verfügung gestellt)
- ▶ Sonderauswertung von Flixbus für den Fernlinienverkehr
- ▶ DB AG: Kennzahlen zum Eisenbahnverkehr der DB 2023: Verkehrsleistungen, Betriebsleistungen und Auslastung nach Traktionsarten der DB AG
- ▶ Sonderabfrage DESTATIS zur Binnenschifffahrt 2022
- ▶ Sonderabfrage DESTATIS zum Flugverkehr 2022

Dabei wurden einzelne Werte z.T. rückwirkend korrigiert, so dass im Detail Unterschiede zu TREMOD 6.43 auftreten (siehe Details in den Kapiteln zu den einzelnen Verkehrsträgern). Verschiedene Werte für 2022 wurden vorab mit DLR abgestimmt, um die Abweichungen zwischen TREMOD und den zeitgleich erstellten Datensätzen für „Verkehr in Zahlen“ gering zu halten. Beim MIV sind die Berechnungsansätze von ifeu, DLR und Intraplan ab 2020 unterschiedlich. Details hierzu finden sich im Kapitel 2.2.2).

Tabelle 8 fasst die Verkehrsleistungsentwicklung von 2010-2022 für den Straßen-, Schienen-, Binnenschiffs- und Flugverkehr zusammen (Stand September 2023).

Tabelle 8: Verkehrsleistungsentwicklung 2010-2022

In Mrd. Pkm (Personenverkehr) bzw. Mrd. tkm (Güterverkehr)

	2010	2019	2020	2021	2022	2010-2019	2019-2020	2019-2022	2021-2022
Personenverkehr davon:	1.083,8	1.129,5	892,7	884,9	972,6	4,2%	-21,0%	-13,9%	9,9%
Straße	983,7	1.011,5	822,5	816,2	862,9	2,8%	-18,7%	-14,7%	5,7%
MIV	893,8	917,4	782,2	776,6	802,5	2,6%	-14,7%	-12,5%	3,3%
Bus	89,9	94,1	40,3	39,5	60,4	4,7%	-57,2%	-35,9%	52,6%
Fernlinienbus	0,0	4,1	1,3	0,6	1,7		-69,6%	-60,0%	157,0%
Nahlinienbus	38,9	38,3	29,3	30,1	36,2	-1,6%	-23,5%	-5,6%	20,0%
Sonst. Busse*	50,9	51,6	9,7	8,8	22,5	1,4%	-81,1%	-56,4%	157,0%
Schiene	100,2	118,0	70,2	68,8	109,7	18%	-40,5%	-7,0%	59,6%
PNV DB	41,4	41,6	23,9	21,4	34,8	0,6%	-42,6%	-16,5%	62,4%
PNV NE	6,6	14,5	11,5	11,5	19,0	120%	-20,7%	31,1%	64,3%

	2010	2019	2020	2021	2022	2010-2019	2019-2020	2019-2022	2021-2022
PFV	36,0	43,9	23,5	24,7	41,5	22%	-46,6%	-5,5%	68,3%
SSU-Bahnen	16,2	18,0	11,4	11,2	14,5	11,1%	-36,5%	-19,1%	30,1%
Güterverkehr davon:	610,7	678,7	653,5	684,9	679,8	11%	-3,7%	0,2%	-0,7%
Straße	440,6	498,6	487,4	505,7	503,1	13%	-2,3%	0,9%	-0,5%
Schiene	107,9	129,2	119,8	131,0	132,6	20%	-7,3%	2,6%	1,2%
Schiene DB	80,4	60,7	56,2	60,3	59,6	-24%	-7,3%	-1,8%	-1,2%
Schiene NE	27,5	68,5	63,5	70,7	73,0	149%	-7,2%	6,6%	3,3%
Binnenschiff	62,3	50,9	46,3	48,2	44,1	-18%	-9,0%	-13,4%	-8,5%
Flugverkehr									
Personenverkehr davon:	194,3	262,7	67,0	79,3	177,0	35%	-74,5%	-32,6%	123,4%
National	10,8	10,6	3,1	2,3	4,3	-1,8%	-71,1%	-59,2%	87,1%
International abgehend	183,5	252,1	63,9	76,9	172,7	37%	-74,6%	-31,5%	124,5%
Güterverkehr davon:	10,8	12,2	11,1	13,4	13,2	13%	-9,2%	7,9%	-1,3%
National	0,042	0,0497	0,0472	0,0512	0,0498	19%	-5,0%	0,3%	-2,7%
International abgehend	10,7	12,2	11,0	13,3	13,1	13%	-9,2%	7,9%	-1,3%

*Gelegenheitsverkehr mit Bussen (nach DESTATIS) und sonstiger Busverkehr (Schätzung)

Quellen: verkehr in Zahlen, DESTATIS, DB AG, Flixbus, Intraplan, Eigene Annahmen

2.2 Straßenverkehr

2.2.1 Fahrzeugbestand

Die 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 für Pkw LPG ab dem Jahr 2001 und CNG ab 2006 in TREMOD berücksichtigt. Elektrofahrzeuge (BEV und PHEV) werden je nach Fahrzeugkategorie ab dem Jahr 2012 oder später in TREMOD 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 2022

Fahrzeugkategorie	Otto	Diesel	Hybrid	CNG/LNG	LPG	BEV	PHEV (D/B)
KKR	≥1960					≥2012	

Fahrzeugkategorie	Otto	Diesel	Hybrid	CNG/LNG	LPG	BEV	PHEV (D/B)
KR	≥1960					≥2012	
Pkw	≥1960	≥1960		≥2006	≥2001	≥2012	≥2012
LNF	≥1960	≥1960		≥2006		≥2012	≥2017
Lkw		≥1960		≥2012		≥2012	
Sz/Lz		≥1960		≥2012		≥2014	
Linienbusse		≥ 1960	≥2012	≥2006		≥2012	
Reisebusse		≥ 1960				≥2012	
Übrige Kfz leicht	≥ 1960	≥ 1960				≥2014	
Übrige Kfz schwer		≥ 1960				≥2014	

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. Dazu gehören beispielsweise Wasserstoff- und Brennstoffzellenfahrzeuge: Ihr Bestand zum 1.1. 2022 umfasste u.a. 1.212 Pkw 4 LNF, 1 Lkw und 70 Busse und damit 0,002% aller Fahrzeuge.

Bei den Pkw nahm der Anteil der Dieselfahrzeuge zwischen 2000 und 2018 von 14% auf 33% zu, danach ging der Anteil bis 2022 zurück auf 31 %. Die alternativen Antriebe (CNG, LPG, BEV und PHEV) machten 2022 etwa 4,0 % des Pkw-Bestands aus.

Tabelle 10: Entwicklung des Pkw-Bestands nach Antriebsart 2000-2022

Anzahl in Millionen Fahrzeuge und Anteile je Antriebsart

Jahr	Anzahl	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%

Jahr	Anzahl	Otto	Diesel	LPG	CNG	BEV	PHEV-B/D
2018	46,8	66%	33%	0,85%	0,17%	0,15%	0,12%
2019	47,4	67%	32%	0,81%	0,17%	0,23%	0,18%
2020	48,0	67%	32%	0,75%	0,17%	0,46%	0,40%
2021	48,4	66%	31%	0,70%	0,17%	0,96%	0,87%
2022	48,7	65%	31%	0,68%	0,17%	1,68%	1,47%

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

Bei den leichten Nutzfahrzeugen nahm seit 2000 der Bestand zu. In den letzten Jahren stieg der Anteil alternativer Antriebe an, welche im Jahr 2022 ca. 2,0 % der LNF-Flotte ausmachten.

Tabelle 11: Entwicklung des LNF-Bestands von 2000-2022 nach Antriebsart

Anzahl in 1000 Fahrzeugen und Anteile je Antriebsart

Jahr	Anzahl	Otto	Diesel	CNG	BEV+PHEV
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%
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%
2019	2.680	6%	93%	0,5%	0,7%
2020	2.812	6%	93%	0,5%	1,0%
2021	2.950	6%	93%	0,4%	1,2%
2022	3065	6%	92%	0,4%	1,6%

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 zeigt sich in den letzten Jahren eine deutliche Zunahme auf insgesamt ca. 1,2% im Jahr 2022. Bei den kleineren Lkw sind dies vor allem batterieelektrische, bei den Sattelzügen hingegen LNG-Fahrzeuge.

Tabelle 12: Entwicklung des SNF-Bestands nach Antrieben 2000-2022

Anzahl in 1000 Fahrzeugen und Anteile je Antriebsart

Jahr	Anzahl	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%
2019	752	99,7%	0,15%	0,12%
2020	750	99,5%	0,31%	0,21%
2021	751	99,1%	0,55%	0,32%
2022	757	98,8%	0,75%	0,41%

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 Trittunterstützung) 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. Als Linienbusse werden basierend auf der vom KBA erfassten Aufbauart alle Busse mit Doppeltüren sowie Niederflrbusse eingeteilt. Hinzu kommen Fernlinienbusse, deren Bestand anhand der Daten von Verkehrsunternehmen und eigener Annahmen geschätzt wird, die von der Kategorie „Sons-tige Reisebusse“ unterschieden werden. Eine weiter zurückreichende aktualisierte Aufteilung konnte mit den vorliegenden Informationen nicht vorgenommen werden.

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, nimmt aber in der neuen Abgrenzung bis 2019 wieder leicht zu. In den Jah-ren 2020 und 2021 waren die Busbestände geringer als im Jahr 2019. Zeitlich fällt dieser Rück-gang mit den Maßnahmen gegen die COVID-19 Pandemie zusammen. Im Jahr 2022 stieg der Be-stand an Reisebussen zwar gegenüber dem Vorjahr, lag jedoch immer noch unter dem Bestand von 2019. Bei den Fernlinienbussen kam es ab 2012 zunächst zu einem Anstieg. Seit 2015 ist ein leichter Rückgang der Bestände zu beobachten und im Jahr 2020 und 2021 ein stärkerer Ein-bruch. Im Jahr 2022 wird ein Bestand von 740 Fernlinienbussen angenommen. Reise- und Fern-linienbusse 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 einem Anteil von 3% ab 2006, der jedoch bis 2022 wieder auf 1,4 % zurückging. Deutlich ge-stiegen in den letzten Jahren ist hingegen der Anteil der Hybrid- und Elektro-Busse, welche im Jahr 2022 zusammen über 9 % aller Linienbusse im Bestand ausmachten.

Tabelle 13: Entwicklung des Busbestands von 2000-2022 insgesamt und Anteil der Linienbusse nach Antriebsart

Anzahl Fahrzeuge und Anteile je Fahrzeug- und Antriebsart

Jahr	Fernli-nien-busse	Sonstige Reise-busse	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	736	23.365	51.904	96%	3,59%	0,33%	0,03%
2013	789	24.020	51.600	96%	3,41%	0,42%	0,04%
2014	856	24.576	51.715	96%	3,19%	0,51%	0,05%
2015	889	24.988	52.045	96%	2,95%	0,59%	0,09%

Jahr	Fernlinienbusse	Sonstige Reisebusse	Linienbus Gesamt	davon Diesel	davon CNG	davon Hybrid	davon BEV
2016	860	25.265	52.538	97%	2,71%	0,61%	0,14%
2017	829	25.374	53.002	97%	2,45%	0,63%	0,19%
2018	781	25.542	53.654	97%	2,17%	0,84%	0,24%
2019	715	25.589	54.638	96%	1,96%	1,38%	0,42%
2020	683	22.030	55.744	95%	1,76%	2,73%	0,86%
2021	681	19.752	57.454	92%	1,53%	4,78%	1,62%
2022	740	21.650	59.188	90%	1,37%	6,52%	2,54%

Anmerkung: Ab 2012 geänderte Aufteilung

Quelle: KBA, eigene Annahmen

Der Bestand der vom KBA registrierten Krafträder hat zwischen 2000 und 2022 zugenommen. Diese waren im Jahr 2022 überwiegend benzinbetrieben, wobei angenommen wird, dass der Anteil der 2-Takter kontinuierlich abnahm. Nur ca. 0,8 % der Krafträder waren batteriebetrieben. Die Zahl der mit Versicherungskennzeichen erfassten Kleinkrafträder (u.a. Mopeds und Roller) blieb in den letzten Jahren relativ konstant. Da im HBEFA bisher nur 2-Takt- und BEV-Mopeds definiert sind, wird für TREMOD angenommen, dass es sich bei den Benzin-KKR bisher um 2-Takter handelte. Für den Anteil der BEV-KKR wurde in Anlehnung an (elektrollerforum.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 2022 vom Zweirad-Industrie-Verband (Zweirad-Industrie-Verband (ZIV) 2023) auf 9,8 Mio. Fahrzeuge geschätzt.

Tabelle 14: Entwicklung des KR-, KKR- und Pedelec-Bestands nach Antrieben 2000-2022

Anzahl in 1000 Fahrzeugen und Anteile je Antriebsart

Jahr	Anzahl KR	davon Otto 2-T	davon Otto 4-T	davon BEV	Anzahl KKR	davon Otto 2-T	davon BEV	Anzahl Pedelecs
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%	1.200
2013	4.019	6%	94%	0,1%	1.993	99,2%	0,4%	1.600
2014	4.100	6%	94%	0,1%	1.959	99,0%	0,5%	2.100

Jahr	Anzahl KR	davon Otto 2-T	davon Otto 4-T	davon BEV	Anzahl KKR	davon Otto 2-T	davon BEV	Anzahl Pedelecs
2015	4.187	6%	94%	0,2%	2.036	98,8%	0,6%	2.500
2016	4.271	5%	94%	0,2%	2.020	98,6%	0,7%	3.000
2017	4.344	5%	94%	0,2%	1.986	98,4%	0,8%	3.500
2018	4.406	5%	95%	0,2%	2.028	98,2%	0,9%	4.500
2019	4.473	5%	95%	0,2%	2.058	98,1%	1,0%	5.400
2020	4.584	5%	95%	0,3%	2.074	98,9%	1,1%	7.100
2021	4.721	5%	95%	0,4%	2.088	98,8%	1,2%	8.500
2022	4.847	5%	94%	0,8%	2.102	98,4%	1,6%	9.800

Quelle: KBA, ZIV/Pedelection. Anmerkung: Bestand zur Mitte des Jahres; Anzahl KKR bis 2016 nach KBA/VIZ, danach geschätzt

2.2.2 Fahrleistungen

Zur Ableitung der Fahrleistung wurden im aktuellen Jahr die im Vorjahr angepassten Methoden verwendet und die Daten aktualisiert. Aufgrund der nicht vorliegenden Daten ist die Entwicklung der Fahrleistungen auf dem Straßennetz der Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen und generell innerorts derzeit die unsicherste Größe im Verkehrsmengengerüst des Straßenverkehrs.

2.2.2.1 Personenverkehr

In den vergangenen Jahren lagen mit „KBA-Verkehr in Kilometern“ (KBA, 2020) Eckwerte für die Gesamtfahrleistung der Pkw, motorisierten Zweiräder und Busse vor, die in TREMOD für die Berechnung des Emissionsinventars zugrunde gelegt wurden. Diese Eckwerte wurden auch in „Verkehr in Zahlen“ (Eisenmann et al. 2021) verwendet. In der Fortschreibung von Verkehr in Kilometer für 2020 (KBA 2023) stellte sich heraus, dass die von KBA für die Hochrechnung der Eckwerte verwendete Methode nicht geeignet ist, um die deutlichen Fahrleistungsrückgänge durch Sondereffekte wie Corona für ein einziges Bezugsjahr verlässlich abzubilden. Daher konnten die Fahrleistungs Eckwerte aus „Verkehr in Kilometern“ für das Jahr 2020, dem Jahr des Ausbruchs von COVID 19, nicht verwendet werden.

Die zentrale Quelle für die Fahrleistung des MIV ab 2020 ist daher die seit 2020 verfügbare Quelle: das Verkehrsbarometer (BAST 2023). Die Änderungsraten der Verkehrsmengen (DTV), die auf Autobahnen und Bundesstraßen von der BAST monatlich ausgewertet werden, werden zu jährlichen Werten zusammengefasst. Daraus resultieren jährliche Änderungsfaktoren je Fahrzeugkategorie (siehe Tabelle 15). Die Fahrleistungen von Pkw 2020 werden beispielsweise aus den Fahrleistungen der Pkw in 2019, multipliziert mit den Änderungsraten des Verkehrsbarometers 2019-2020 berechnet. Die Methodik wird für 2021 und 2022 weiterhin verwendet.

Tabelle 15: Jährliche Änderungsrate der DTV laut Verkehrsbarometer

	FzKat	Autobahn	Bundesstraße
2022/2021	KR	+4,4%	+8,4%
	Pkw	+5,4%	+2,4%
2021/2020	KR	-3,5%	-11,1%

	FzKat	Autobahn	Bundesstraße
2020/2019	Pkw	+0,4%	-0,9%
	KR	-13,6%	+2,4%
	Pkw	-19,2%	-13,1%

Quelle: (BASt 2023), eigene Berechnungen

Die Änderung der DTV der Kräder des Verkehrsbarometers werden sowohl für die TREMOD Kategorien KR als auch KKR verwendet.

Im Jahr 2022 war sowohl bei den Pkw wie auch den Krafträdern ein deutlicher Anstieg der Fahrleistung auf Autobahnen und Bundesstraßen ggü. 2021 zu beobachten.

Da bisher keine zuverlässige Quelle für die restlichen Straßenkategorien herangezogen werden kann, wird die Änderungsrate der Fahrleistung auf diesen Straßen der Änderungsrate auf Bundesstraßen je Fahrzeugkategorie nach dem Verkehrsbarometer gleichgesetzt. Aktuelle Analysen zur Verwendung der automatischen Straßenzähler der Bundesländer zeigen Potentiale aber erfordern mehr Untersuchungen um für die Ableitung der Fahrleistung benutzt werden zu können, wie im Bericht „Verbesserung der Vorjahresschätzung der Klimagasemissionen des Verkehrssektors“ (Annex A) im Detail erläutert.

Die Ergebnisse der MIV Fahrleistungen 2019 – 2022 sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Die Pkw Fahrleistung, die ca. 97% der MIV Fahrleistungen ausmachen, sind 2022 mit 563 Milliarden Kilometer noch unter dem vor-Corona Niveau von 2019.

Tabelle 16: Fahrleistungen des MIV in TREMOD 2019-2022

FzKat	Fahrleistung 2019 (Mio.km)	Fahrleistung 2020 (Mio.km)	Fahrleistung 2021 (Mio.km)	Fahrleistung 2022 (Mio.km)	Änderungsrate 2021-2022 (%)
KKR	4.922	5.039	4.479	4.856	+8,4%
KR	9.920	9.946	8.928	9.636	+7,9%
Pkw	644.815	548.109	545.266	563.149	+3,3%
Uekfzl	1.014	862	861	893	+3,7%

Quelle: KBA, BASt, eigene Berechnungen

Die übrigen Fahrzeuge „Uekfzl“ sind aus der Pkw Kategorie abgeleitet. Sie haben einen Anteil von ca. 0,3% auf Autobahn und 0,1% auf den anderen Straßenkategorien. Die Quelle ist (Bäumer et al. 2016), es wird nach 2014 angenommen, dass dieser Anteil konstant bleibt.

Die Fahrleistungen der Linien- und Fernlinienbusse sind für 2021 aus Destatis (Destatis 2023) übernommen.. Leider erscheint die Publikation für das aktuelle Jahr 2022 erst nach der Frist für die Berichterstattung und kann nur nachträglich einbezogen werden. Dementsprechend sind die Werte für Busse 2022 in Abstimmung mit DLR für „Verkehr in Zahlen“ wie folgt abgeleitet:

- Für *Linienbusse* wurde angenommen, dass die Fahrleistung 2021 gegenüber 2020 unverändert ist und 2022 ggü. 2021 um 6% zunimmt.

- Für *Fernlinienbusse* wurden Fahrleistungsdaten von Flixbus analysiert. Der abgeleitete starke Anstieg von 82% ggü. 2021 wurde für alle Straßenkategorien übernommen.
- Für *Reisebusse* wurde die Fahrleistung 2022 ähnlich zu der Änderungsrate der FLbus geschätzt (in Absprache mit DLR).

Insgesamt steigen die Busfahrleistungen 2022 ggü. 2021 mit 19% stark an (siehe Tabelle 17), trotzdem sind die Fahrleistungen noch unter dem vor Corona Niveau von 2019.

Tabelle 17: Busfahrleistung in TREMOD

FzKat	Fahrleistung 2019 (Mio.km)	Fahrleistung 2020 (Mio.km)	Fahrleistung 2021 (Mio.km)	Fahrleistung 2022 (Mio.km)	Änderungsrate 2021-2022 (%)
SRBus	1.896	407,1	500,6	910,2	+82%
FLBus	128	48,7	27,0	60,7	+125%
LBus	2.593	2.490,6	2.643,1	2.801,7	+6,0%
Summe	4.617	2.946	3.171	3.772,6	+19%

Quellen: KBA, BAST, eigene Berechnungen

Die für TREMOD abgeleiteten Fahrleistungen der Pkw unterscheiden sich 2022 von den Angaben in „Verkehr in Zahlen“, da das DLR ein anderes Verfahren zur Fortschreibung der Werte anwendet. Beim Busverkehr wurden die Methode und die Annahmen abgestimmt, so dass hier eine Übereinstimmung erzielt werden konnte.

2.2.2.2 Güterverkehr

Die Basisquellen für die Berechnung der Fahrleistung des Güterverkehrs sind die Fahrleistungen der Mautstatistik (BALM 2023) und des Verkehrsbarometers (BAST 2023), beide erst ab 2019 vollständig verfügbar.

Ab 2019 wird die Mautstatistik als Hauptquelle für die Fahrleistung des Schwergüterverkehrs auf Autobahnen und Bundesstraßen verwendet. Allerdings deckt die Mautstatistik die Lkw zwischen 3,5t und 7,5t zul. GG. nicht ab. Ihre Fahrleistung wird daher geschätzt: Es wird angenommen, dass die Fahrleistung einschließlich dieser Klasse um 10 % höher ist als die mautpflichtige Fahrleistung (basierend auf die Fahrleistungen 2019 in (KBA 2023)). Die Änderungen der Fahrleistung der Mautstatistik von 2019 bis 2022 ist in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Änderung der Fahrleistung auf Autobahn laut Mautstatistik

Jahr	FzKat	Autobahn	Bundesstraße
2022/2021	Lkw>zGG. 7,5t	-0,9%	-2,5%
2021/2020	Lkw>zGG. 7,5t	4,4%	0,9%
2020/2019	Lkw>zGG. 7,5t	-0,9%	-3,3%

In der Mautstatistik ging die Fahrleistung des Güterverkehrs 2022 ggü. 2021 nach einem Anstieg im Vorjahr etwas zurück. 2022 erreicht die Fahrleistung der Lkw (über 7,5t) insgesamt 18,3 Milliarden Kilometer.

Zur Plausibilisierung können die Fahrleistungsänderung der Mautstatistik mit den Daten vom Verkehrsbarometer verglichen werden. Dafür müssen die gesamten Fahrleistungen der Mautstatistik auf die Fahrzeugkategorien runtergebrochen werden. Leider wird in der Mautstatistik nicht nach Fahrzeugkategorie (Lkw, LZ, SZ) unterschieden, nur nach Größenklassen. Die Übersetzung der Größenklasse in Fahrzeugkategorien ist aber nicht möglich, sodass die Verteilung der Güterfahrleistung nach Fahrzeugkategorien aus dem Verkehrsbarometer (BASt 2023) abgeleitet wird. Diese Verteilung ist über die letzten 3 Jahren relativ konstant geblieben, mit einer leichten Tendenz zur Erhöhung des Anteils der Sattelzüge, wie der Tabelle 19 zu entnehmen ist.

Tabelle 19: Anteil an der Güterverkehrsfahrleistung je Fahrzeugkategorie ab 2019 laut Verkehrsbarometer

Anteil an FzKat (Bundesautobahn)	2019	2020	2021	2022
LkW	21%	20%	20%	20%
LZ	16%	16%	16%	16%
SZ	63%	63%	64%	64%
Anteil an FzKat (Bundesstraßen)	2019	2020	2021	2022
LkW	36%	36%	35%	34%
LZ	16%	16%	16%	15%
SZ	48%	48%	49%	50%

Quelle: (BASt 2023)

Der Vergleich der Wachstumsrate von Verkehrsbarometer (VB) und Mautstatistik (MT) auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen 2022 vs. 2021 der jeweiligen Fahrzeugkategorie zeigt eine relativ gute Übereinstimmung der Ergebnisse des Schwergüterverkehrs auf Bundesstraße (siehe Tabelle 20). Dagegen weichen die Ergebnisse auf Autobahn teilweise ab: die Ergebnisse aus der Mautstatistik (-0,9%) zeigen einen stärkeren Rückgang der Fahrleistungen der Lkw, LZ und SZ als das Verkehrsbarometer (mindestens -2%).

Die Unterschiede zwischen den Quellen und die entsprechenden resultierenden Unsicherheiten der aus der Mautstatistik angenommenen Wachstumsrate scheinen aber akzeptabel (u.a. mit der Tatsache, dass die Lkw<7,5t in die Mautstatistik nicht einfließen) und bleiben innerhalb einer Bandbreite von unter 2 Prozentpunkten.

Die LNF hingegen sind nur vom Verkehrsbarometer abgedeckt und können nicht mit der Mautstatistik verglichen werden. Aus der Statistik ist ein klarer Anstieg der Fahrleistung 2022 zu erkennen. Damit sind die Fahrleistungen von LNF und SZ über dem Niveau von 2019, während Lkw und LZ noch unter diesem vor-Corona Niveau bleiben (wie in Tabelle 21 abgebildet).

Tabelle 20: Wachstumsrate der Fahrleistung bzw. der DTV auf Autobahnen und Bundesstraßen laut Mautstatistik und Verkehrsbarometer

Jahr	FzKat	Verkehrsbarometer		Mautstatistik*	
		Autobahn	Bundesstraße	Autobahn	Bundesstraße
2022/2021	LNF	4,5%	2,3%		
	Lkw	-2,6%	-3,8%		

Jahr	FzKat	Verkehrsbarometer		Mautstatistik*	
2021/2020	LZ	-3,7%	-3,7%		
	SZ	-2,1%	-1,4%		
	Mautverkehr			-0,9%	-2,5%
	LNF	8,3%	6,6%		
	Lkw	3,6%	1,5%		
2020/2019	LZ	2,7%	1,3%		
	SZ	5,6%	4,7%		
	Mautverkehr			0,9%	4,4%
	LNF	-7,8%	-4%		
	Lkw	-7,3%	-2,5%		
	LZ	-2,5%	-2,2%		
	SZ	-0,6%	-1,8%		
	Mautverkehr			-0,9%	-3,3%

Quellen: (BASt 2023), (BALM 2023), eigene Berechnungen

Da keine zuverlässige Quelle für die Fahrleistung der jeweiligen Fahrzeugkategorien auf den restlichen Straßenkategorien herangezogen werden kann, wird das Wachstum der Fahrleistung wie das Wachstum auf Bundesstraßen laut Mautstatistik angenommen angelehnt. In den Lkw sind die UeKfzs enthalten, und ihr Anteil, der von 2014 bis 2019 anhand der Änderungsrate der Fahrleistung von KBA-ViK abgeleitet wurde, ab 2019 wird dieselbe Änderungsrate wie die Lkw verwendet. Ihr Anteil an die Lkws Fahrleistung bleibt bei ca. 8,4% stabil.

Aus der Kumulierung der Fahrleistungsergebnisse je Straßen- und Fahrzeugkategorie resultiert die gesamte Fahrleistung je Fahrzeugkategorie für Deutschland (siehe Tabelle 21).

Tabelle 21: Fahrleistung des Güterverkehrs 2019-2022

In Mio. km

Fahrleistung TREMOD	2019	2020	2021	2022
LNF	53.657	50.983	54.572	56.132
Lkw	19.589	18.717	18.860	18.334
UeKfzs	1.632	1.551	1.576	1.542
Lz	10.829	10.598	10.705	10.404
SZ	33.385	33.262	34.734	34.464
Summe Schwerverkehr	65.435	64.128	65.875	64.744
Summe Güterverkehr	119.092	115.111	120.447	120.876

Quellen: (BASt 2023), (BALM 2023), eigene Berechnungen

Zur Plausibilisierung der Fahrleistungen der Schwere Nutzfahrzeuge in Deutschland kann die Verkehrsleistung aus „Verkehr in Zahlen 2023/2024“ herangezogen werden (siehe Kapitel 2.1, Tabelle 8). Diese geht von einem leichten Rückgang der Beförderungsleistung für den Straßenverkehr 2022/2021 von -0,5% aus. Verglichen mit Fahrleistungsrückgang von -1,7% aufgrund der überwiegend gesunkenen Fahrleistung auf BAB und Bundesstraßen von Verkehrsbarometer und Mautstatistik (siehe Tabelle 18), weist es auf eine leichte Erhöhung der Effizienz der Güterlogistik hin.

Die Fahrleistung der LNF 2022 lag laut Intraplan (Intraplan 2023) bei 58,51 Mrd. km, und damit 4% höher als der TREMOD Wert. Ein Grund für die Abweichung ist möglicherweise, dass bei Intraplan auch größere Fahrzeuge bis 3,5t Nutzlast in der Kategorie „leichte Nutzfahrzeuge“ enthalten sind. Hinzu kommen methodische Unterschiede, u.a. deckt Intraplan die Inländerfahrleistung ab, wenn wir in TREMOD die Inlandsfahrleistungen umfassen. 2022/2021 weicht der Zuwachs leicht ab: 3,6% für Intraplan gegenüber 2,9% in TREMOD.

2.2.2.3 Zeitreihe der Fahrleistungen 1990-2022

Die folgende Tabelle 22 fasst die Fahrleistungen aller Fahrzeugkategorien ab 1990 zusammen. Die Inlandsfahrleistungen in Deutschland werden dominiert von der Pkw-Fahrleistung (Anteil 2022: 80 %). Diese haben von 1990 bis 2022 um 15 % zugenommen. Im gleichen Zeitraum stiegen die Fahrleistungen der schweren Nutzfahrzeuge um 78 % und, mit Abstand am meisten, die der leichten Nutzfahrzeuge (+292 %).

Tabelle 22: Fahrleistung in Deutschland nach Fahrzeugkategorien 1990-2022

In Mrd. km

Jahr	Summe	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	605,0	522,0	11,6	3,9	19,0	42,4	6,2
1994	612,8	524,1	11,8	3,9	21,2	45,0	6,8
1995	625,1	530,9	12,3	3,9	23,3	47,8	6,9
1996	633,6	535,2	13,0	3,9	24,8	49,6	7,1
1997	640,5	537,7	13,6	4,0	26,2	51,9	7,2
1998	653,5	547,1	14,0	4,0	27,8	53,3	7,3
1999	670,6	558,9	14,9	4,0	29,8	55,6	7,4
2000	674,5	560,3	15,2	4,0	31,5	56,2	7,3
2001	687,5	571,3	15,0	4,1	33,5	56,0	7,5
2002	697,3	579,5	15,4	4,1	34,7	56,1	7,7
2003	692,7	574,5	15,2	4,1	35,2	56,1	7,6

Jahr	Summe	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2004	705,7	587,0	15,3	4,1	35,5	56,0	7,7
2005	692,6	574,8	15,6	4,1	35,9	54,3	7,8
2006	697,2	580,5	15,6	4,2	36,7	57,0	3,2
2007	704,0	584,1	15,8	4,2	37,8	59,0	3,1
2008	700,9	581,2	15,6	4,2	38,3	58,7	2,9
2009	707,3	591,6	15,8	4,2	38,8	54,0	2,9
2010	713,0	595,5	15,3	4,2	39,2	55,9	2,8
2011	724,4	605,2	14,9	4,3	39,7	57,5	2,8
2012	725,1	606,5	14,5	4,3	40,2	56,8	2,8
2013	730,9	611,6	14,2	4,2	40,7	57,4	2,8
2014	745,9	622,7	14,2	4,3	43,1	58,7	2,9
2015	756,8	630,0	14,5	4,5	45,3	59,8	2,7
2016	767,8	637,2	14,5	4,6	47,5	61,2	2,8
2017	777,2	642,8	14,5	4,6	49,7	63,0	2,7
2018	780,4	642,2	14,6	4,6	51,9	64,4	2,6
2019	784,4	644,8	14,8	4,6	53,7	63,8	2,6
2020	682,0	548,1	15,0	2,9	51,0	62,6	2,4
2021	683,2	545,3	13,4	3,2	54,6	64,3	2,4
2022	703,2	563,1	14,5	3,8	56,1	63,2	2,4

Quelle: TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

2.2.3 Energieverbrauch und Emissionsfaktoren

2.2.3.1 Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs wurden aus dem HBEFA 4.2 für TREMOD 6.41 übernommen (Notter et al. 2022). In TREMOD 6,51 fand keine Aktualisierung dieser Daten statt.

2.2.3.2 Anpassung der Effizienzentwicklung bei Pkw, LNF, SNF und Bus

Der spezifische Energieverbrauch der Kraftfahrzeuge in TREMOD basiert wie bisher auf den im HBEFA vorgegebenen Verbrauchsfaktoren der Fahrzeugschichten, die mit dem PHEM-Modell der TU Graz für die Verkehrssituationen im realen Fahrbetrieb ermittelt wurden ((Tietge et al. 2020) 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 erstgenannten Vorhaben wurde eine

Methode zur Berücksichtigung des realen Kraftstoffverbrauchs abgeleitet, bei dem für jede Antriebstechnologie Zuschläge auf den Typprüfwert abgeleitet wurden. Diese Werte wurden in TREMOD 6.51 bis 2022 aktualisiert. Tabelle 23 zeigt die Typprüfwerte für Benzin- und Diesel-Pkw sowie die im Vorhaben abgeleiteten Zuschläge und die resultierenden Realverbrauchswerte.

Tabelle 23: CO₂-Emissionen aus der Typzulassung (NEFZ) und abgeleitete reale CO₂-Emissionen der Pkw-Neuzulassungen in Deutschland 2011 bis 2022

	Benzin Test-zyklus (g CO ₂ /km)	Benzin Zuschlag Real	Benzin Real (g CO ₂ /km)	Diesel Test-zyklus (g CO ₂ /km)	Diesel Zuschlag Real	Diesel Real (g CO ₂ /km)
2011	145	23%	179	146	22%	178
2012	141	25%	176	142	25%	177
2013	135	29%	174	140	30%	182
2014	132	32%	174	137	33%	182
2015	129	35%	174	132	37%	181
2016	128	36%	174	130	40%	182
2017	129	36%	176	132	42%	188
2018	132	37%	180	138	43%	197
2019	134	37%	184	140	43%	200
2020	127	38%	175	139	44%	200
2021	125	38%	173	141	44%	203
2022	127	38%	175	138	44%	198

Quelle: (Tietge et al. 2020), KBA

Bei den leichten Nutzfahrzeugen wird die gleiche Methode verwendet wie bei den Pkw. In TREMOD 6.51 wurden die Werte ebenfalls bis zum Jahr 2022 fortgeschrieben. Die resultierenden Werte sind für Benzin- und Dieselfahrzeuge in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: CO₂-Emissionen aus der Typzulassung (NEFZ) und abgeleitete reale CO₂-Emissionen der LNF-Neuzulassungen in Deutschland 2011 bis 2022

	Benzin Test-zyklus (g CO ₂ /km)	Benzin Zuschlag Real	Benzin Real (g CO ₂ /km)	Diesel Test-zyklus (g CO ₂ /km)	Diesel Zuschlag Real	Diesel Real (g CO ₂ /km)
2013	209	18%	246	194	37%	266
2014	213	18%	251	192	40%	267
2015	193	24%	240	188	43%	268
2016	180	27%	228	181	47%	266
2017	179	27%	227	175	50%	262
2018	188	28%	240	176	50%	264

	Benzin Test-zyklus (g CO ₂ /km)	Benzin Zuschlag Real	Benzin Real (g CO ₂ /km)	Diesel Test-zyklus (g CO ₂ /km)	Diesel Zuschlag Real	Diesel Real (g CO ₂ /km)
2019	186	28%	237	178	46%	260
2020	183	29%	235	174	47%	256
2021	162	29%	208	171	47%	251
2022	163	29%	209	166	47%	244

Quelle: (Tietge et al. 2020), KBA

Für die Antriebe mit CNG und LPG der Pkw und LNF wurden die Werte sowie die Entwicklung bis 2022 ebenfalls aktualisiert.

Bei den SNF wurden die Verbrauchsfaktoren des HBEFA 4.2 übernommen. Eine Aktualisierung auf Basis von Monitoringdaten oder anderer Realdaten ist hier bisher nicht möglich.

Die Verbrauchswerte der BEV werden bis zum Baujahr 2021 aus dem HBEFA 4.2 verwendet. Das Jahr 2022 wird aufbauend auf dem Wert des Jahres 2021 und der relativen Entwicklung zwischen 2022-2021 nach den Monitoring-Werten aktualisiert.

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 (Nichtbundeseigene Eisenbahnen NE), 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 auf dieser aggregierten Ebene. Allerdings liegen dieser – zumindest beim Verkehr der DB AG – differenzierte Werte (unterschieden nach Zuggattungen, Baureihen und Motoren) zugrunde, die von der DB AG jährlich aufbereitet, aggregiert und für TREMOD bereitgestellt werden.

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.

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 2022 im Personennahverkehr bei 35 % und im Güterverkehr bei 55 %.

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 2022 im Personennahverkehr bei 15,8 %, im Personenfernverkehr noch bei 1,4 % und im Güterverkehr (ohne Rangieren) bei 6,3 %. Im Jahr 2000 waren es noch 27% (Personennahverkehr), 4,5% (Personenfernverkehr) und 8,2% (Güterverkehr).

Für die sonstigen Eisenbahnen (NE) kann ab dem Jahr 2013 eine Abschätzung des Dieselanteils auf Basis von Trassenkilometern aus Fahrplandaten bis 2022 vorgenommen werden, die von der DB AG intern zur Verfügung gestellt wurde. Danach lag der Anteil der Dieseltraktion der sonstigen Eisenbahnen 2022 im Personennahverkehr bei ca. 30 % und im Güterverkehr bei 6 %.

Tabelle 25: Verkehrsleistungsentwicklung des Personenverkehrs der Eisenbahnen in Deutschland 1994-2022

In Mrd. Pkm

Jahr	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
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

Jahr	Personennahverkehr DB	Personennahverkehr NE	Personennahverkehr gesamt	davon mit Diesel	Personenfernverkehr
2012	43,4	8,2	51,5	12,3	37,2
2013	43,6	10,3	53,8	12,7	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	13,5	54,3	11,6	39,3
2017	41,9	13,2	55,0	11,6	40,3
2018	41,9	13,4	55,3	11,0	42,6
2019	41,6	14,5	56,1	10,2	43,9
2020	23,9	11,5	35,4	6,9	23,5
2021	21,4	11,5	32,9	6,9	24,7
2022	34,8	19,0	53,7	11,1	41,5

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

Nicht dargestellt ist in Tabelle 25 die Verkehrsleistungsentwicklung der ausschließlich elektrisch betriebenen Straßen-, Stadt und U-Bahnen. Deren Verkehrsleistung stieg von 1994 bis 2019 um rund 42 % auf knapp 18 Mrd. Pkm. 2022 lag sie noch um 19% unter dem Wert von 2019, jedoch schon 30% über dem Wert von 2021.

Tabelle 26: Verkehrsleistungsentwicklung des Güterverkehrs der Eisenbahnen in Deutschland 1994-2022

In Mrd. tkm

Jahr	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
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

Jahr	Güterverkehr DB	Güterverkehr NE	Güterverkehr gesamt	davon mit Diesel	Hafen- und Werkbahnen
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	29,5	113,3	6,0	3,4
2012	78,5	31,6	110,1	5,5	3,7
2013	75,2	37,4	112,6	6,0	4,1
2014	74,8	40,2	115,0	5,3	4,1
2015	71,0	50,0	121,0	5,5	4,1
2016	68,6	60,3	128,9	6,7	4,7
2017	67,6	63,6	131,2	7,1	4,9
2018	64,2	65,8	130,0	7,1	5,0
2019	60,7	68,5	129,2	6,7	4,4
2020	56,2	63,5	119,8	5,7	4,4
2021	60,3	70,7	131,0	7,7	4,4
2022	59,6	73,0	132,6	8,1	4,4

Anmerkung: Dieselanteil im Güterverkehr ab 2013 revidiert; ab 2021 wird ein Teil der Rangierleistungen der DB als Zugleistung erfasst (erhöht den Dieselanteil im Güterverkehr)

Quellen: Verkehr in Zahlen, DB AG, 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 im Jahr 2018. Da die Revision der Energiebilanzen ab 2003 keine wesentlichen Änderungen beim Schienenverkehr ergab, wird eine Abstimmung der Werte weiterhin empfohlen.

Tabelle 27: Berechneter Dieserverbrauch der Eisenbahnen in Deutschland im Vergleich mit der Energiebilanz 1994-2022

In PJ

Jahr	Dieserverbrauch DB	Dieserverbrauch NE	Dieserverbrauch DB+NE	Dieserverbrauch HWB	Dieserverbrauch Energiebilanz	Differenz Energiebilanz/Verbrauch berechnet (DB+NE+HWB)
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	20,6	5,9%
2005	14,0	4,7	18,8	0,8	19,3	-1,4%
2006	13,3	4,5	17,8	0,5	17,5	-4,2%
2007	13,0	4,4	17,4	0,5	17,2	-4,2%
2008	12,8	5,3	18,2	0,5	16,7	-10,6%
2009	11,4	5,6	17,0	0,5	15,3	-12,1%
2010	11,4	5,7	17,2	0,5	15,6	-11,6%
2011	11,1	5,8	16,9	0,6	15,7	-10,0%
2012	10,6	6,1	16,7	0,6	14,4	-16,5%
2013	10,4	8,0	18,4	0,7	14,6	-23,5%
2014	9,5	5,8	15,3	0,7	13,0	-18,1%
2015	8,8	6,8	15,6	0,7	14,1	-13,3%
2016	8,7	6,8	15,5	0,8	14,5	-10,8%
2017	8,9	7,0	15,9	0,8	12,0	-28,2%
2018	8,7	7,3	16,0	0,8	10,0	-40,7%
2019	8,3	6,7	15,0	0,7	11,4	-27,5%
2020	7,5	7,2	14,7	0,7	11,7	-24,3%
2021	7,6	6,8	14,5	0,7	11,8	-22,0%

Jahr	Dieserverbrauch DB	Dieserverbrauch NE	Dieserverbrauch DB+NE	Dieserverbrauch HWB	Dieserverbrauch Energiebilanz	Differenz Energiebilanz/Verbrauch berechnet (DB+NE+HWB)
2022	7,4	6,7	14,1	0,7	11,2	-24,4%

Quellen: DB AG, AG Energiebilanzen, eigene Berechnungen

Trotz zunehmender Verkehrsleistungen blieb der Stromverbrauch für den Fahrbetrieb annähernd gleich. Der Stromverbrauch des Schienenverkehrs liegt bei den AG Energiebilanzen nach der Revision ab 2003 nun auf ähnlichem Niveau wie TREMOD, mit Abweichungen von +6% (2003 und 2004) bis -11% (2008 und 2022). Nähere Informationen zu den Werten der AGEB liegen nicht vor.

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 (Knörr und Borken 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 28: Emissionsfaktoren des dieselbetriebenen Schienenverkehrs für ausgewählte Jahre

In g/kg

Komp.	Zugart	1995	2005	2010	2015	2018	2019	2020	2021	2022
CO	Rangieren	18,0	9,0	5,6	4,3	3,9	3,7	4,1	3,9	4,0
	GV	11,5	9,7	9,8	5,4	5,3	5,4	6,4	5,5	5,4
	PFV	14,1	9,4	6,5	6,7	5,2	6,5	6,1	6,0	5,2
	PNV	10,6	5,1	3,9	3,7	3,5	3,4	3,3	3,4	3,3
HC	Rangieren	2,9	2,1	2,3	1,7	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7
	GV	11,5	9,7	9,8	5,4	5,3	5,4	6,4	5,5	5,4
	PFV	14,1	9,4	6,5	6,7	5,2	6,5	6,1	6,0	5,2
	PNV	10,6	5,1	3,9	3,7	3,5	3,4	3,3	3,4	3,3
NOX	Rangieren	49,4	38,5	39,0	34,0	33,1	32,7	31,7	33,1	32,9
	GV	50,5	53,9	51,5	35,1	33,6	34,3	35,5	33,0	32,6
	PFV	60,0	53,3	48,4	49,7	40,1	48,9	46,1	45,8	39,2
	PNV	49,2	45,7	39,4	34,9	31,2	28,1	30,5	30,9	28,4

Komp.	Zugart	1995	2005	2010	2015	2018	2019	2020	2021	2022
Part	Rangieren	1,9	1,5	1,0	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
	GV	1,9	1,6	1,3	0,6	0,6	0,7	0,8	0,7	0,7
	PFV	1,8	0,9	0,6	0,5	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4
	PNV	1,8	0,6	0,6	0,6	0,5	0,4	0,5	0,5	0,4

Quelle: DB AG

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 (Heidt et al. 2016) und (Knörr et al. 2013) beschrieben. Weitere Aktualisierungen betreffen die spezifischen Energieverbräuche und Emissionsfaktoren, welche in (Knörr et al. 2020) beschrieben wurden.

2.4.2 Verkehrs- und Fahrleistungen

Die Verkehrsleistungen der Binnenschifffahrt sind seit dem Jahr 2000 (66,5 Mrd. km) tendenziell gesunken. Verschiedene Sonderereignisse haben dabei zu jährlichen Schwankungen geführt. So war das Jahr 2018 im 2. Halbjahr von Niedrigwasserständen geprägt, wodurch die Verkehrsleistung 46,9 Mrd. tkm sank (Destatis 2019b). In den letzten Jahren hatten neben ungünstigen Wasserständen auch die COVID-19 Pandemie im Jahr 2020 und 2021 einen dämpfenden Einfluss. Besonders betroffen von Niedrigwasser waren die Sommermonate im Jahr 2022. Unter anderem deshalb war die Verkehrsleistung mit 44,1 Mrd tkm im Jahr 2022 auf einem historischen Tiefstand. Dabei sank auch die durchschnittliche Beladung pro Schiffskilometer. (siehe Tabelle 29).

Tabelle 29: Verkehrs- und Fahrleistung der Binnenschifffahrt 1995-2022

Bezugsjahr	Verkehrsleistung (Mrd. tkm)	Fahrleistung (Mio. km)	Mittlere Beladung (t)
1995	64,0	55,7	1.148
2000	66,5	57,2	1.161
2005	64,1	54,5	1.175
2010	62,3	56,0	1.112
2011	55,0	54,3	1.013
2012	58,5	50,7	1.153
2013	60,1	50,5	1.190
2014	59,1	51,6	1.146
2015	55,3	51,2	1.080
2016	54,3	48,4	1.123
2017	55,5	50,7	1.095

Bezugsjahr	Verkehrsleistung (Mrd. tkm)	Fahrleistung (Mio. km)	Mittlere Beladung (t)
2018	46,9	46,0	1.018
2019	50,9	48,7	1.046
2020	46,3	48,3	960
2021	48,2	49,4	976
2022	44,1	47,7	925

Quelle: Verkehrsleistungen DESTATIS, Fahrleistung DESTATIS und zusätzliche Annahmen. Anmerkungen: Die mittlere Beladung ist der Quotient aus Verkehrs- und Fahrleistung. Sie berücksichtigt die Tragfähigkeit sowie die durchschnittliche Auslastung (inklusive Leerfahrten) der Schiffsflotte in einem Jahr.

2.4.3 Energieverbrauch

Der Energieverbrauch (Diesel) ging von 26,8 PJ im Jahr 1995 bis auf 16,2 PJ im Jahr 2022 zurück. Der mittlere spezifische Energieverbrauch lag 2022 bei 0,37 MJ pro tkm. Er wird von verschiedenen Faktoren wie den befahrenen Wasserstraßen, der Zusammensetzung der Schiffsflotte und deren Auslastung bestimmt. Letztere war beispielsweise im Jahr 2018 und im Jahr 2022 wegen Niedrigwassers geringer als sonst, wodurch ein höherer spezifischer Energieverbrauch in diesen Jahren resultiert.

Tabelle 30: Verkehrsleistung und Energieverbrauch der Binnenschifffahrt 1995-2022

Bezugsjahr	Verbrauch (PJ)	spez. Verbrauch (MJ/tkm)
1995	26,8	0,42
2000	26,5	0,40
2005	23,8	0,37
2010	21,4	0,34
2011	20,4	0,37
2012	19,7	0,34
2013	19,9	0,33
2014	19,9	0,34
2015	19,5	0,35
2016	18,4	0,34
2017	19,2	0,35
2018	16,9	0,36
2019	16,8	0,33
2020	16,0	0,35
2021	16,7	0,35
2022	16,2	0,37

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

Die Emissionsfaktoren für Binnenschiffe wurden in früheren Forschungsvorhaben aus verschiedenen Messdaten von Binnenschiffsmotoren und Literaturwerten abgeleitet (Heidt et al. 2016; Knörr et al. 2013). Zusätzlich werden seit der Version TREMOD 6.03 Korrekturfaktoren für die Emissionsfaktoren in Abhängigkeit der mittleren Motorlast angewendet, welche auf Daten von TNO zurückgehen (Ligterink et al. 2019). Folgende Baujahre bzw. Emissionsstandards werden unterschieden:

- ▶ vor 1970
- ▶ 1970-1980
- ▶ 1980-1989
- ▶ 1990-2002
- ▶ 2003-2006 (ZKR I)
- ▶ 2007-2018 (ZKR II/ EU IIIA)
- ▶ 2019+ (EU V) <300 kW
- ▶ 2019+ (EU V) >=300 kW
- ▶ 2019+ (EU V) LNG

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. Die Altersverteilung der Binnenschiffsmotoren wurde zuletzt in TREMOD 6.1 (Berichterstattung 2021) aktualisiert. Die mittlere Lebensdauer wird je nach Baujahr und Schiffsgröße zwischen 14 und 38 Jahren angenommen, wobei auch noch ältere Motoren im Bestand vorkommen. Aus den baujahrabhängigen Emissionsfaktoren und den jeweiligen Flottenzusammensetzungen in einem Jahr werden in Tabelle 31 die durchschnittlichen Emissionsfaktoren für ausgewählte vergangene Jahre dargestellt. Es zeigt sich, dass diese in den meisten Fällen über die Jahre stark gesunken sind.

Tabelle 31: Mittlere Emissionsfaktoren der Binnenschifffahrt (in g/kg) für ausgewählte Jahre

Schadstoff	1994	2000	2005	2010	2015	2020	2022
CO	16,9	14,5	12,8	11,0	9,8	8,9	8,6
HC	3,9	3,4	3,2	2,9	2,7	2,5	2,4
NO _x	57,1	57,4	55,4	52,9	50,1	47,9	46,6
Part	2,3	2,0	1,6	1,3	1,1	1,0	1,0
CH ₄	0,094	0,082	0,076	0,070	0,064	0,060	0,058
N ₂ O	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043
NH ₃	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
BC	1,126	0,979	0,835	0,674	0,610	0,571	0,550
SO ₂	2,600	2,600	2,600	2,600	0,016	0,016	0,016

Schadstoff	1994	2000	2005	2010	2015	2020	2022
Benzol	0,075	0,065	0,060	0,056	0,051	0,047	0,046
Toluol	0,031	0,027	0,025	0,023	0,021	0,020	0,019
Xylol	0,031	0,027	0,025	0,023	0,021	0,020	0,019

Quelle: (Heidt et al. 2016; Knörr et al. 2013, 2020); 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 grenzüberschreitenden Flüge beinhaltet. Weiter wird differenziert in Personen- und Güterverkehr.

Im Rahmen der TREMOD-Aktualisierung werden die Verkehrsmengen und die resultierenden Emissionen für das Jahr 2022 integriert. Zudem werden die Emissionsfaktoren der folgenden neuen Flugzeugtypen integriert: Airbus A321-P2F, Airbus A330-300 F, Embraer EMB - 195-E2.

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 (HVF) wird dabei durch eine Abfertigung von mehr als 150.000 Passagiereinheiten (1 Passagier bzw. 100 kg Fracht bzw. Post) definiert, siehe (Destatis 2019a). In der Aktualisierung werden somit 23 Flughäfen abgedeckt (Stand 2022). Daraus lassen sich über die Zuordnung nach Entfernungsklassen die Flugzeugkilometer sowie die Personen- und Tonnenkilometer berechnen.

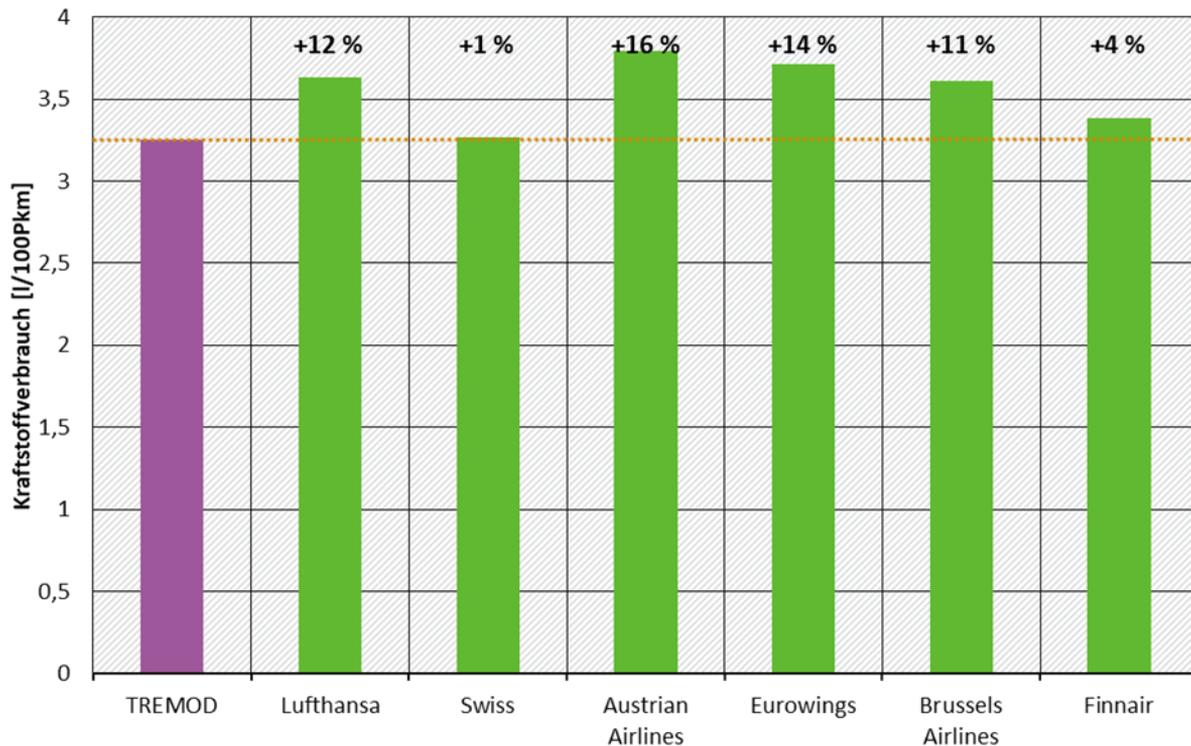
Für den gewerblichen Verkehr auf sonstigen Flugplätzen (weniger als 150.000 Passagiereinheiten) und den nicht-gewerblichen Flugverkehr liegen weniger differenzierte Daten vor. Hier erfolgten Abschätzungen anhand der vom Statistischen Bundesamt ausgewiesenen Anzahl Starts differenziert nach Flugzeuggrößenklassen. Diese erfolgte anhand der GENESIS-Datenbank Tabelle 46421-0051 von Destatis, die den sonstigen Flugverkehr abdeckt. Beim gewerblichen Verkehr auf den sonstigen Flugplätzen kam es bisher zu einer Doppelbilanzierung einer kleinen Teilmenge des Verkehrs. Es werden in der o.g. Sonderauswertung auch Flüge erfasst, die von den sonstigen Flugplätzen auf die Hauptverkehrsflughäfen stattfinden. Diese sind jedoch auch in der GENESIS-Tabelle enthalten und müssen daher hier rausgerechnet werden. Dies wurde bis zur Aktualisierung des Jahres 2022 fälschlicherweise nicht gemacht. Der Fehler wurde nun auch rückwirkend ab 1990 behoben, wobei die Doppelbilanzierung nur ca. 3-8 % der gewerblichen Starts auf den sonstigen Flugplätzen betrifft und demnach der resultierende Fehler auf die gesamten Emissionen vernachlässigbar klein ist (ca. 0,2 % bei CO₂).

Der spezifische Energieverbrauch und die verfügbaren Emissionsfaktoren für jede Flugphase und Distanzklasse werden typenfein dem „EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook“ bzw. dem dazugehörigen Berechnungstool „Master emission calculator“ (in der aktuellen Version 2019) entnommen (EEA 2019). Nicht vorhandene Kennzahlen (wie bspw. das maximal zulässige Startgewicht; kurz MTOW) werden durch andere Quellen ergänzt. Hierfür werden insb. Flugzeugdatenblätter der Hersteller verwendet. Im Fall von Datenlücken im Bereich der flugzeugspezifischen Emissionsfaktoren und Verbräuchen werden Abschätzungen getroffen. Für diese Abschätzung werden die eingesetzten Triebwerkstypen aus der ICAO *Aircraft Engine Emissions Databank* (ICAO 2019) verwendet. Hierin werden sowohl die Verbräuche für unterschiedliche Lastzustände sowie die CO-, HC- und NO_x-Emissionen angegeben. 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 und mehrmals jährlich aktualisiert. Anhand dieser Datenbank können gute Abschätzung für Flugzeugtypen, die im EMEP/EEA Guidebook nicht gegeben sind, getroffen werden. Neben dem Guidebook und der ICAO Turbinendatenbank diene die FOCA Datenbanken des Bundesamts für Zivilluftfahrt der Schweiz, siehe (BAZL 2017), als Datenquelle für Propellermaschinen und Drehflügler.

Die Zuordnung von Energieverbrauch und Emissionen auf Personen- und Güterverkehr 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 Personenkilometer (auf HVF) liegen aktuell niedriger als andere Angaben, so z. B. Verbrauchsangaben der Fluggesellschaften der Lufthansa Group und Finnair für das Jahr 2022; siehe Abbildung 3. Vergleicht man die Verbräuche des Jahres 2022 mit denjenigen des Vorjahres lässt sich feststellen, dass sowohl nach der TREMOD-Berechnung als auch den Angaben der Fluggesellschaften der Verbrauch pro Personenkilometer deutlich gesunken ist. Der Verbesserung liegt nach TREMOD bei ca. 12 %. Hauptursache ist die gestiegene Auslastung.

Abbildung 3: Vergleich des in TREMOD ermittelten Kerosinverbrauchs im Flugverkehr (auf HVF) mit Angaben von Fluggesellschaften für das Jahr 2022



Anmerkung: Die Werte können durchaus voneinander abweichen, da Einflussgrößen wie die durchschnittlichen Flugdistanzen, eingesetzte Flugzeugtypen und Auslastungen Auswirkungen auf den spezifischen Verbrauch haben. Quellen: Lufthansa, Swiss, Austrian Airlines, Eurowings und Brussels Airlines aus, (Lufthansa Group 2023) Finnair aus (Finnair 2023), TREMOD.

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.

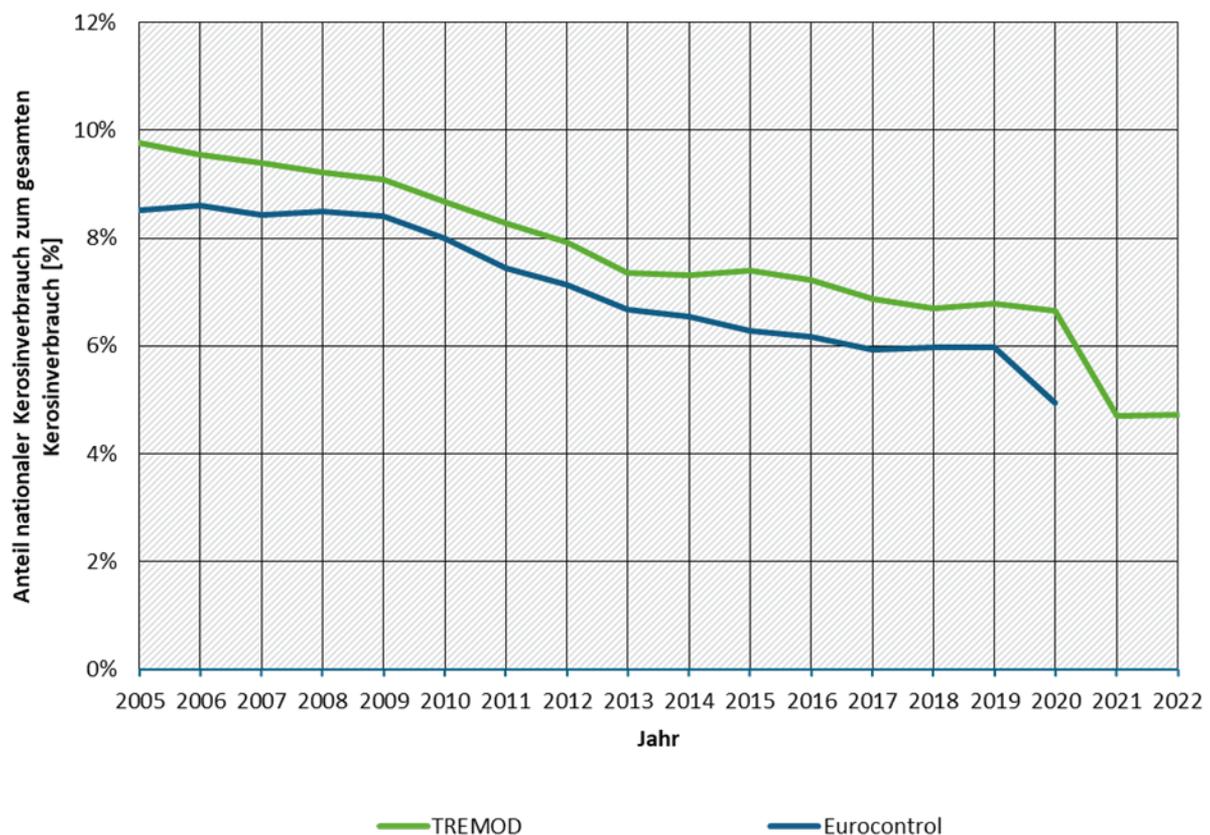
- ▶ Die Aufteilung des gesamten Energieeinsatzes auf nationalen und internationalen Flugverkehr wird entsprechend den ermittelten Anteilen aus den TREMOD-Ergebnissen vorgenommen. Der Energieeinsatz des nationalen Verkehrs wird direkt aus TREMOD übernommen. Die Differenz der Energiebilanz zum errechneten 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 4).
- ▶ 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 entsprechenden kraftstoffspezifischen 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 4: 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. Die Werte des Jahres 2021 und 2022 sind von Eurocontrol nicht gegeben. Quellen: Eurocontrol und eigene Berechnung (mit TREMOD).

2.5.3 Verkehrs- und Betriebsleistungen

Die Verkehrsleistung des gewerblichen Flugverkehrs auf den Hauptverkehrsflughäfen (national + international) ist in der Vergangenheit stark angestiegen. Die Personenverkehrsleistung ist dabei zwischen 1990 und 2019 um den Faktor 3,6 gestiegen und die Güterverkehrsleistung hat sich fast vervierfacht. In den „Coronajahren“ 2020-2022 lag jedoch die Verkehrsleistung des Personenverkehrs deutlich unter dem Niveau von 2019. Im Jahr 2020 kam es zu einem Rückgang von 76 % gegenüber 2019. In den Jahren 2021 und 2022 stieg der Wert zwar wieder, aber er lag noch 31 % unterhalb der Verkehrsleistung vom Jahr 2019. Der Güterverkehr war allgemein nicht so stark von der Coronapandemie betroffen wie der Personenverkehr. Im Jahr 2020 lag die

Verkehrsleistung ca. 9 % unterhalb von 2019. Seit 2021 liegt er wiederum leicht oberhalb des Vor-Coronaniveaus.

Seit 1990 haben sich sowohl die zurückgelegte Strecke als auch die Kapazität der Flugzeuge deutlich erhöht. Des Weiteren kam es bei den Starts des gesamten gewerblichen Flugverkehrs auf den Hauptverkehrsflughäfen (HVF) zwischen 1990 und 2019 zu einem Anstieg von 86 %. Im selben Zeitraum kam es so zu einem Anstieg der Flugzeugkilometer in Höhe von 178 %. Die durchschnittliche Reisedistanz von in Deutschland abgehenden Flügen (national + international) im Personenverkehr erhöhte sich im selben Zeitraum von 944 km auf 1.411 km. Dies ist insbesondere auf den überproportional starken Anstieg des internationalen Flugverkehrs zurückzuführen, der eine höhere mittlere Reisedistanz aufweist als der nationale Flugverkehr. Im Jahr 2020 kam es aufgrund der Pandemie zu einem Rückgang der Starts und Flugzeugkilometer um ca. 58 % ggü. 2019. In den Jahren 2021 und 2022 stiegen die Werte wiederum ggü. 2020. Es starteten 12 % bzw. 69 % mehr gewerbliche Flüge von den HVF. Hierbei stiegen die Flugzeugkilometer um 23 % bzw. 83 % ggü. 2020. Tabelle 32 fasst die Kennzahlen des nationalen + internationalen gewerblichen Flugverkehrs auf den HVF zusammen.

Tabelle 32: Gewerbl. Flugverkehr auf den Hauptverkehrsflughäfen 1990-2022 (nat. + internat.)

Jahr	Starts	Flug-km	VL – PV [Pkm]	VL –GV [tkm]
1990	602.000	569 Mio.	71 Mrd.	3.082 Mio.
1995	758.000	829 Mio.	107 Mrd.	4.501 Mio.
2000	922.000	1.039 Mio.	143 Mrd.	5.678 Mio.
2005	1.040.000	1.230 Mio.	170 Mrd.	7.201 Mio.
2010	1.047.000	1.355 Mio.	194 Mrd.	10.773 Mio.
2015	1.029.000	1.420 Mio.	221 Mrd.	11.425 Mio.
2019	1.121.000	1.582 Mio.	255 Mrd.	12.212 Mio.
2020	470.000	683 Mio.	62 Mrd.	11.090 Mio.
2021	527.000	840 Mio.	79 Mrd.	13.353 Mio.
2022	796.000	1.250 Mio.	177 Mrd.	13.182 Mio.

Quelle: TREMOD.

Der gewerbliche nationale Flugverkehr auf den HVF stagnierte im Gegensatz zum internationalen Verkehr zwischen 299.000 und 370.000 Starts im Zeitraum 1990-2019. Der Anteil des nationalen Flugverkehrs an den Starts hat sich dadurch im betrachteten Zeitraum von 49,8 % im Jahr 1990 auf 28,1 % im Jahr 2019 verringert. In den Jahren 2020-2022 lagen die nationalen Starts deutlich unterhalb des Vor-Coronaniveaus. Im Jahr 2022 betrug der Anteil 35,5 %. Deutlich niedriger sind seine Anteile im Jahr 2022 an den Flugzeugkilometern mit 4,4 %, den Personenkilometern mit 2,3 % und den Tonnenkilometern mit 0,4 %. Tabelle 33 fasst die verkehrlichen Größen des nationalen gewerblichen Flugverkehrs auf den Hauptverkehrsflughäfen zusammen.

Tabelle 33: Gewerblicher nationaler Flugverkehr auf den Hauptverkehrsflughäfen 1990-2022

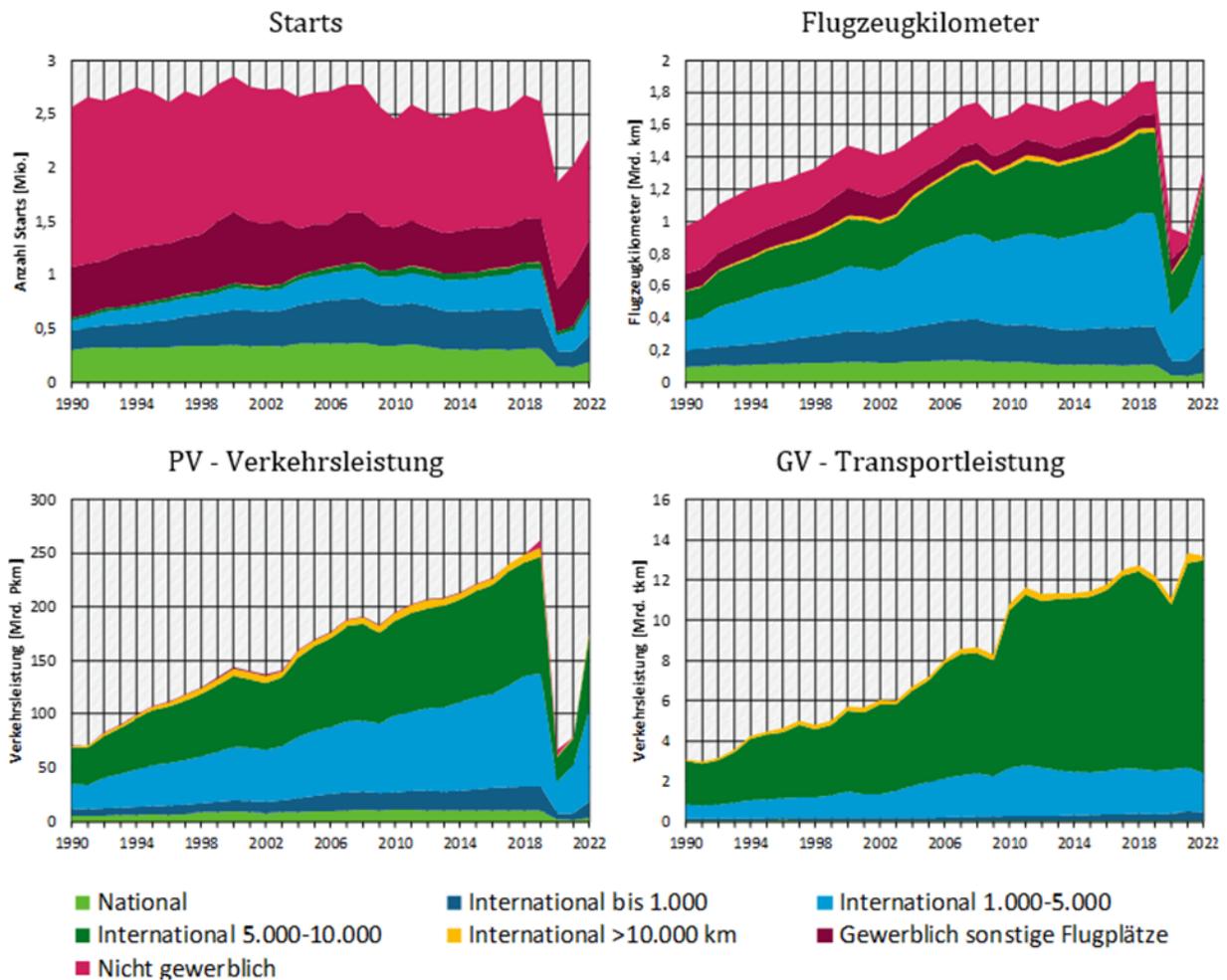
Jahr	Starts	Flug-km	VL – PV [Pkm]	VL –GV [tkm]
1990	300.000	94 Mio.	6,0 Mrd.	60 Mio.

Jahr	Starts	Flug-km	VL – PV [Pkm]	VL –GV [tkm]
1995	327.000	111 Mio.	7,0 Mrd.	75 Mio.
2000	349.000	128 Mio.	9,3 Mrd.	75 Mio.
2005	364.000	131 Mio.	9,2 Mrd.	43 Mio.
2010	342.000	125 Mio.	10,5 Mrd.	42 Mio.
2015	300.000	107 Mio.	9,9 Mrd.	43 Mio.
2019	315.000	109 Mio.	9,9 Mrd.	50 Mio.
2020	151.000	45 Mio.	2,6 Mrd.	47 Mio.
2021	140.000	38 Mio.	2,1 Mrd.	51 Mio.
2022	187.000	55 Mio.	4,1 Mrd.	50 Mio.

Quelle: TREMOD 6.51

Beträchtliche Anteile an den Starts haben der gewerbliche Flugverkehr auf sonstigen Flugplätzen sowie der nicht-gewerbliche Flugverkehr. Zwar sank der Anteil an den Gesamtstarts seit 1990, aber im Jahr 2019 betrug er noch 57 %. In den Jahren 2020-2022 sank der gewerbliche Flugverkehr jedoch deutlich überproportional. Nicht-gewerbliche Starts sanken in den Jahren um rund 11 % ggü. 2019. Da beim sonstigen Flugverkehr im Schnitt deutlich kleinere Maschinen über kürzere Distanzen eingesetzt werden als beim gewerblichen Verkehr auf den Hauptverkehrsflughäfen, haben die weniger detaillierten Ausgangsdaten beim sonstigen Flugverkehr – trotz der hohen Anzahl an Starts – einen vernachlässigbaren Einfluss auf die gesamten Energiemengen und Emissionen des Flugverkehrs. So liegt bspw. der Anteil des sonstigen Flugverkehrs (nicht-gewerblicher Flugverkehr und gewerblicher Flugverkehr auf den sonstigen Flugplätzen) am gesamten Energiebedarf des Flugverkehrs in Deutschland aktuell bei ca. 1-2 %. Abbildung 5 veranschaulicht die relevanten Verkehrskennzahlen zwischen 1990 und 2022.

Abbildung 5: Entwicklung der Starts, Flugzeugkilometer und Verkehrsleistungen des Flugverkehrs in Deutschland 1990-2022

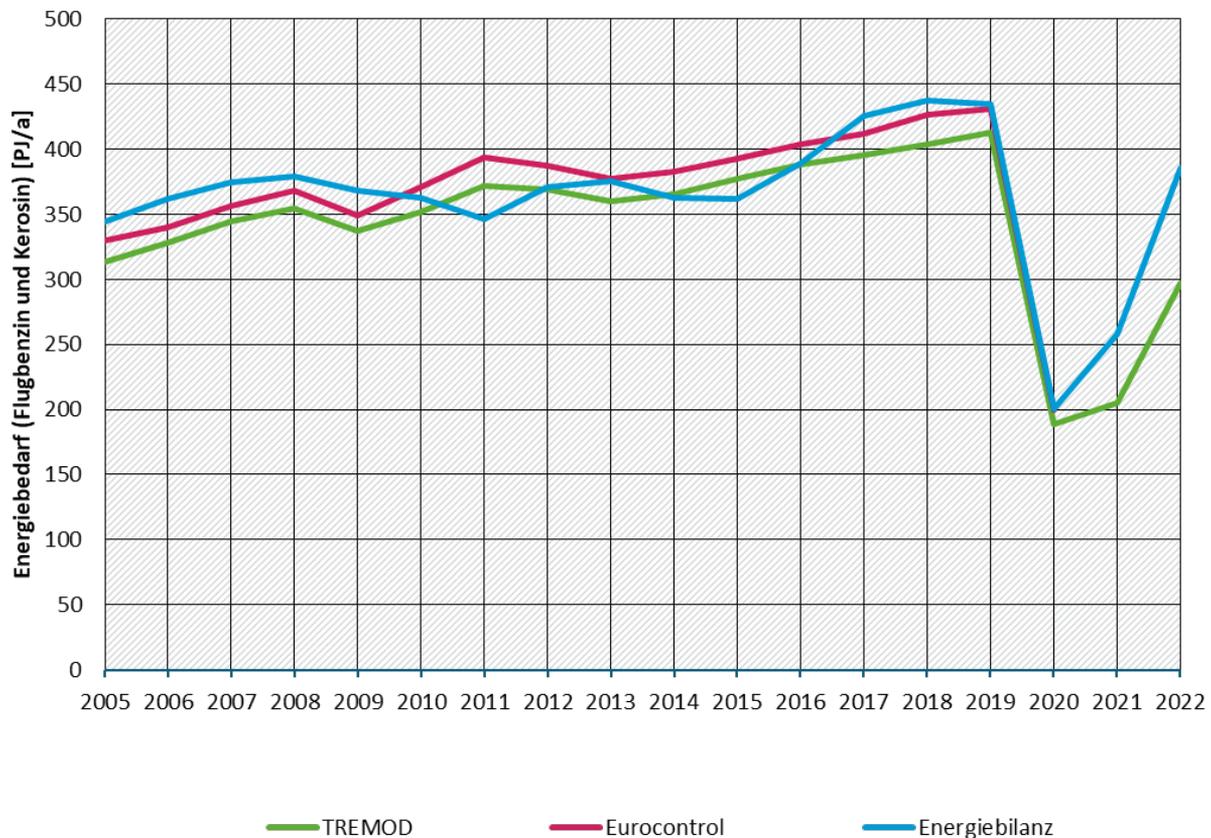


Anmerkungen zur Datenbasis: Anzahl Starts und Aufkommen für den gewerblichen Flugverkehr auf ausgewählten Flugplätzen ist differenziert nach national/international und nach Distanzklassen gegeben. Hieraus können die Flugzeugkilometer und Verkehrsleistung für den gewerblichen Verkehr auf ausgewählten 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 6). 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.

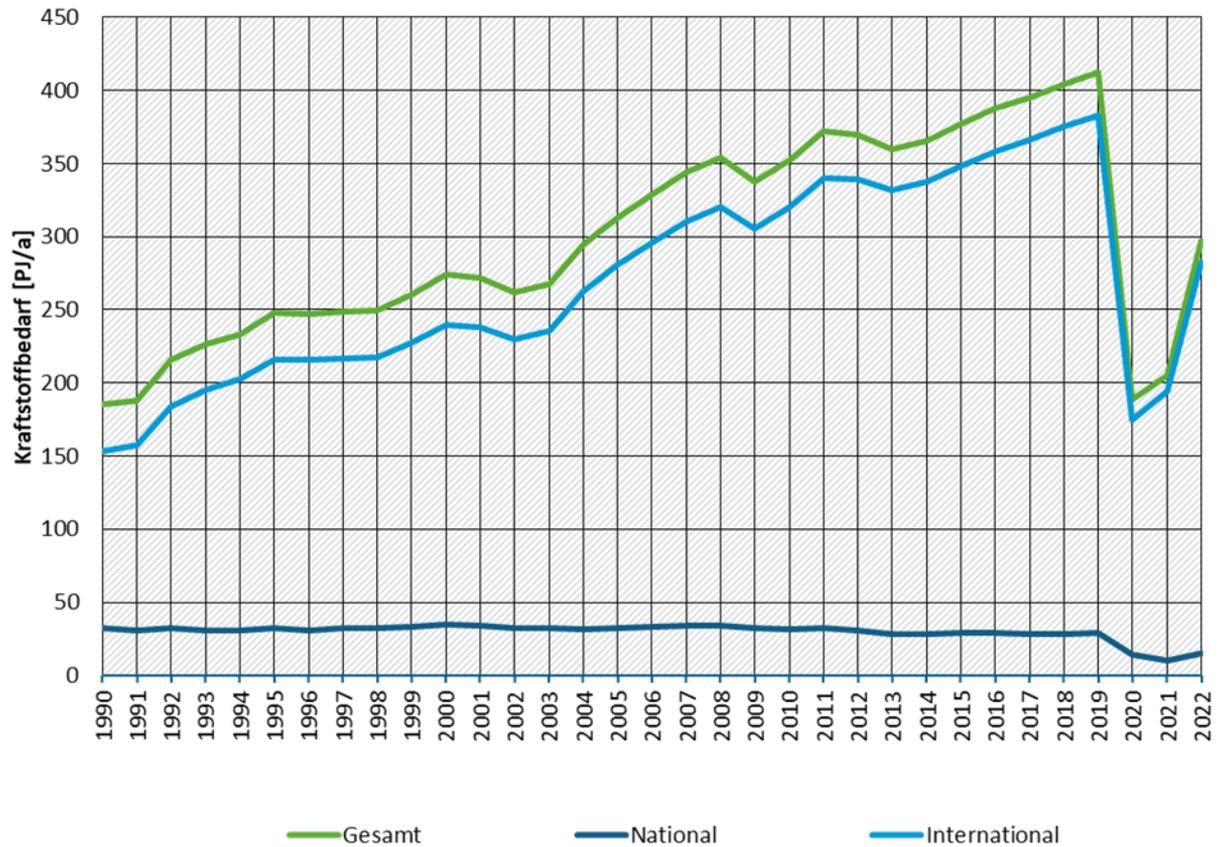
Abbildung 6: Jährlicher Energiebedarf (Flugbenzin und Kerosin) des Flugverkehrs in Deutschland nach TREMOD, Eurocontrol und Energiebilanz



Quellen: (AG Energiebilanzen o.J.), Eurocontrol und eigene Berechnungen (mit TREMOD). Für Eurocontrol liegen keine Werte für die Jahre 2021 und 2022 vor.

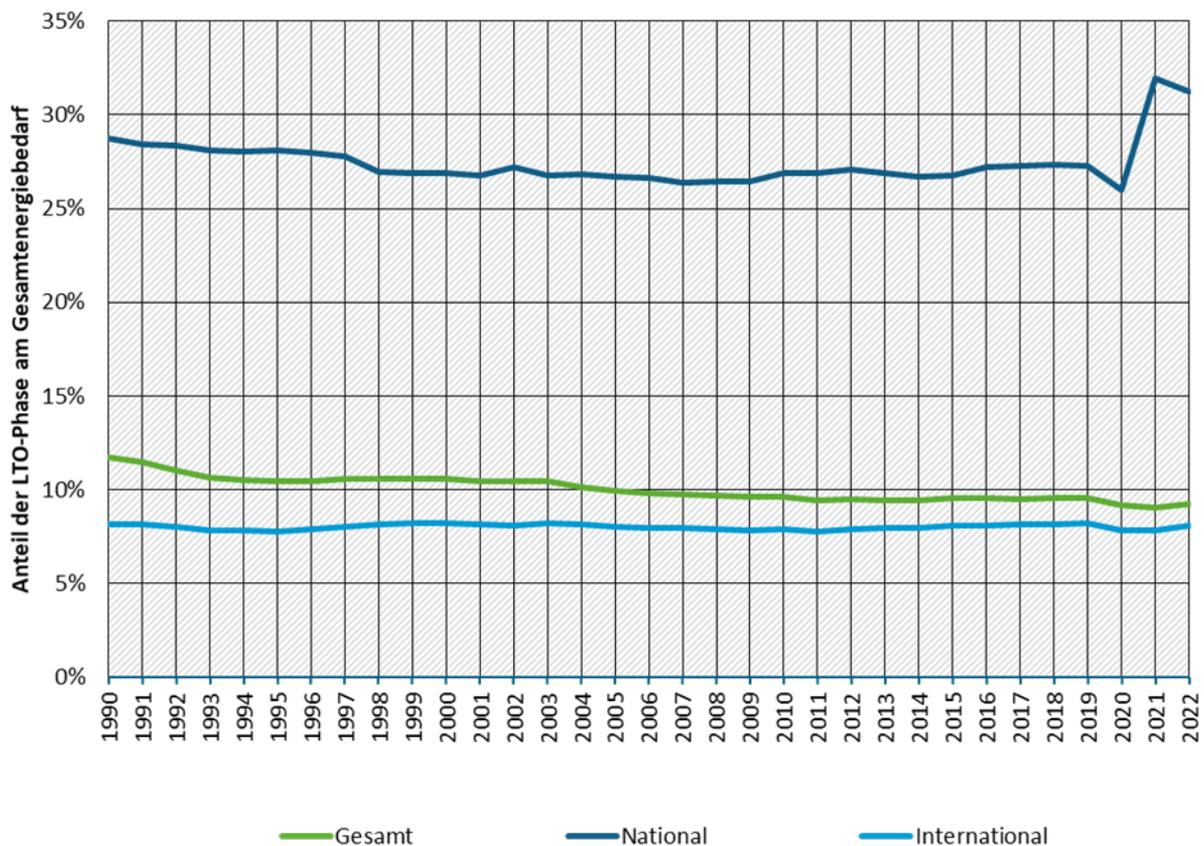
Der Energiebedarf (Kerosin und Flugbenzin) des gesamten Flugverkehrs ist nach TREMOD zwischen 1990 und 2019 um 123 % gestiegen. Im Jahr 2020 sank er ggü. 2019 um 54 %, sodass er ungefähr das Niveau (+2,0 %) von 1990 erreichte. In den Jahren 2021 und 2022 stieg der Energiebedarf wieder um 9 % bzw. 58 % ggü. 2020. Da der Energiebedarf des nationalen Flugverkehrs zwischen 1990 und 2019 nahezu unverändert blieb, betrug sein Anteil im Jahr 2019 nur noch 7 % im Vergleich zu 17 % im Jahr 1990. Im Jahr 2020 lag der Anteil bei 8 %. In den beiden Folgejahren betrug der Anteil nur noch 5 %, siehe Abbildung 7. Die Start- und Landephase (LTO) hat im Mittel über alle Flüge einen Anteil von 9 %, bei den nationalen Flügen (überwiegend Kurzstrecken) liegt dieser Anteil deutlich höher bei 31 % (siehe Abbildung 8). Der mittlere Anteil des LTO ging über die Zeitreihe zurück (abgesehen vom Jahr 2021), da die durchschnittliche Reisedistanz stieg. In den Jahren 2021 und 2022 sank die durchschnittliche Reisedistanz deutlich, wodurch der Anteil des LTO am Gesamtverbrauch bei den nationalen Flügen stieg. Während im Jahr 2019 die durchschnittliche Flugweite national ca. 347 km betrug, lag der Wert in den Folgejahren bei 300, 269 bzw. 296 km.

Abbildung 7: Energiebedarf (Flugbenzin und Kerosin) für den nationalen, internationalen und gesamten Flugverkehr



Quelle: eigene Berechnung (mit TREMOD).

Abbildung 8: Anteil der LTO-Phase am Kraftstoffverbrauch

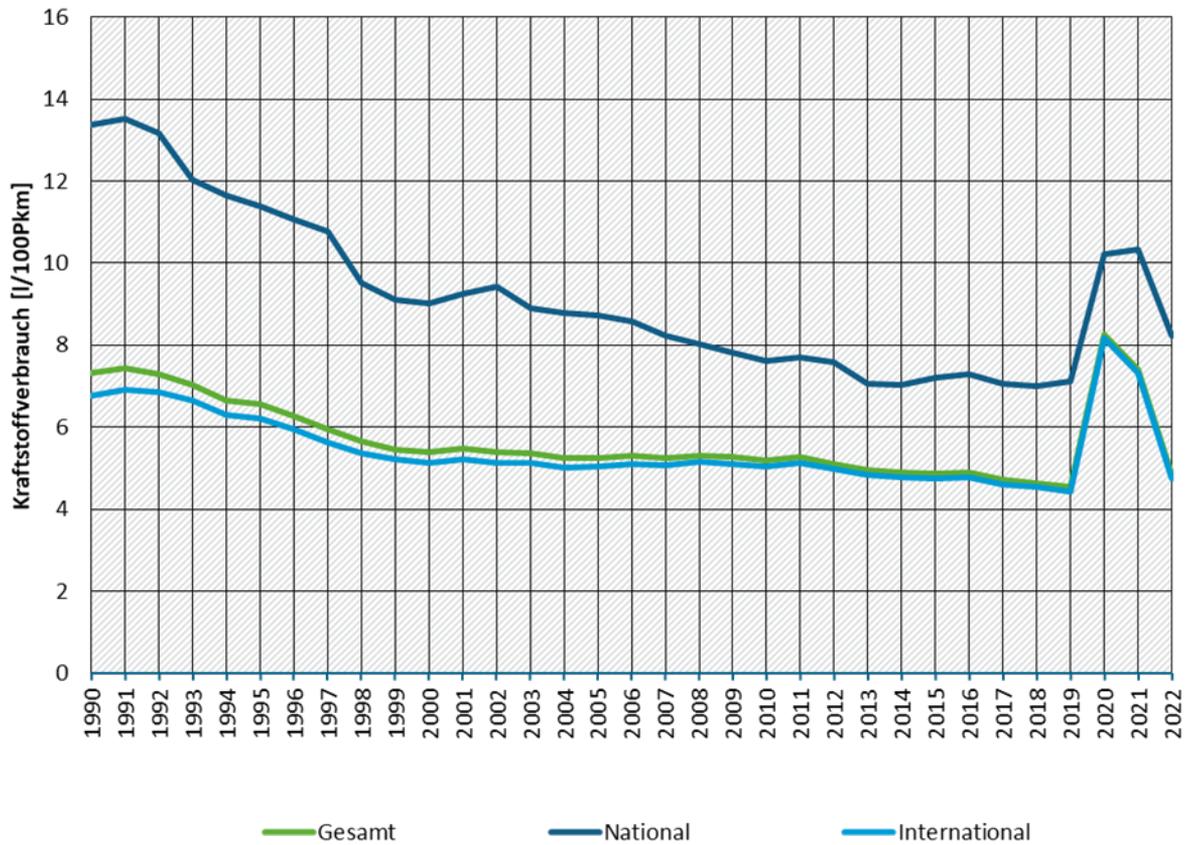


Quelle: eigene Berechnung mit TREMOD

Setzt man den Energiebedarf in Beziehung zur Verkehrsleistung im Personenverkehr (auf HVF) zeigt sich ein zum Teil deutlicher Rückgang, der von etwa -44 % bei nationalen Flügen bis zu -33 % bei internationalen Flügen zwischen 1990 und 2019 reicht. Dieser Unterschied ist insbesondere auf den höheren Anstieg des Auslastungsgrads bei Kurzstreckenflügen zurückzuführen. Aufgrund der niedrigen Flugzeugauslastung im Jahr 2020 stieg der spezifische Verbrauch pro Personenkilometer national um 32 % und international um 21 % ggü. 2019. In den Folgejahren stieg die Auslastung wieder, sodass der spezifische Verbrauch zwar gesunken ist, aber noch über dem Niveau von 2019 liegt.

Trotz höherer Minderungsraten bis 2019 ist der spezifische Verbrauch des nationalen Flugverkehrs im Jahr 2019 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 9 zeigt die spezifischen Kraftstoffverbräuche pro Personenkilometer.

Abbildung 9: Kraftstoffverbrauch pro Personenkilometer im nationalen und internationalen Flugverkehr



Quelle: eigene Berechnung (mit TREMOD)

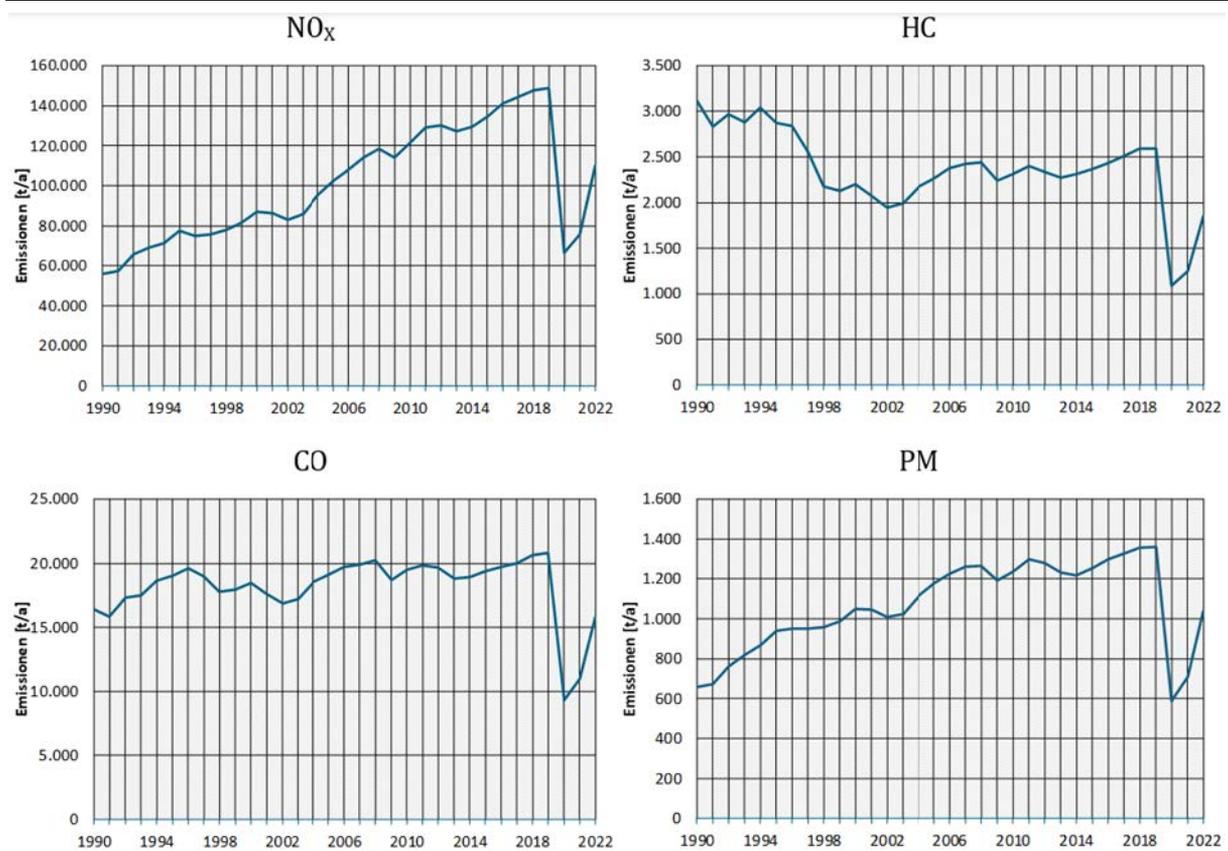
2.5.5 Schadstoffe

Viele Emissionsfaktoren sind in der Zeitreihe konstant und die Emissionen damit direkt proportional zum Kraftstoffverbrauch. Demgegenüber werden die Emissionsfaktoren für NO_x, CO und HC und PM flugzeugtypenspezifisch definiert. Betrachtet man den Verlauf der Emissionen kann mit Ausnahme der „Corona“-Jahre eine Stagnation der NO_x-, HC-, PM- und CO-Emissionen beim nationalen Flugverkehr festgestellt werden. Die Werte lagen vor dem Jahr 2020 im Bereich von ca. 9.500 t (NO_x), 420 t (HC), 92 t (PM) und 3900 t (CO).

Beim internationalen Verkehr (auf den Hauptverkehrsflughäfen) stiegen die PM-Emissionen zwischen 1990 und 2019 um 125 %. Auch bei den Stickoxiden kann ein deutlicher Anstieg bis 2019 beobachtet werden (+198 %). Die HC-Emissionen sanken trotz des deutlichen Verkehrsmengenanstiegs im internationalen Verkehr lediglich um 22 % bis 2019. Die absoluten CO-Emissionen stiegen zwischen 1990 und 2019 um 33 %. Die Corona-Pandemie führte bei allen Schadstoffen zu einem deutlichen Rückgang der absoluten Emissionen, wobei seit 2022 wieder ein steigender Trend beobachtbar ist.

Abbildung 10 stellt die zeitliche Entwicklung dieser Schadstoffemissionen des gewerblichen Flugverkehrs auf den ausgewählten Hauptverkehrsflughäfen dar.

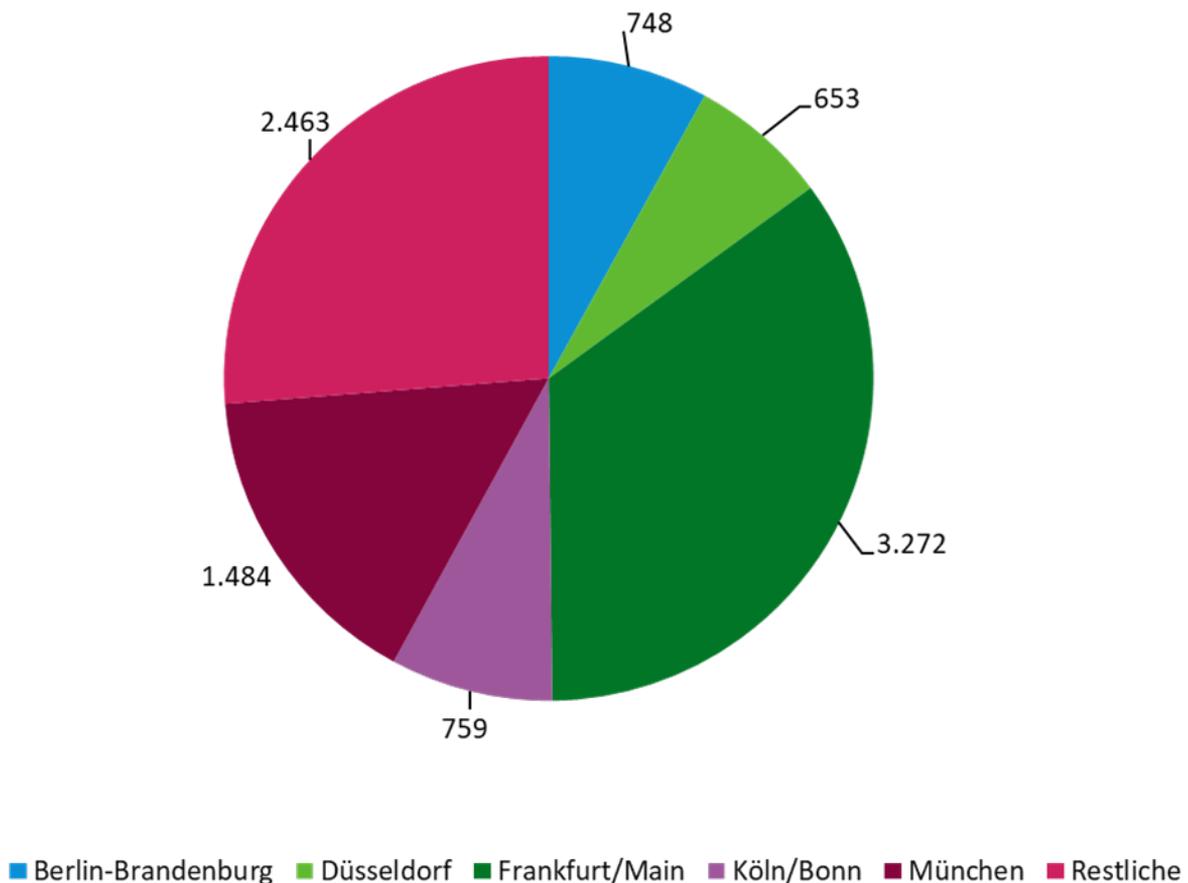
Abbildung 10: NO_x-, CO-, HC- und PM-Emissionen des Flugverkehrs auf den ausgewählten Flughäfen 1990-2022



Quelle: eigene Berechnung (mit TREMOD).

Abbildung 11 zeigt exemplarisch die NO_x-Emissionen des gewerblichen Flugverkehrs der fünf größten Flughäfen im Jahr 2022. Die größte Belastung hat der Flughafen Frankfurt am Main mit rund 3.270 t NO_x pro Jahr (ca. 35 %). 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 2022 differenziert nach Flughäfen [t/a]



Quelle: eigene Berechnung mit TREMOD. Anmerkung: Der nicht gewerbliche Flugverkehr ist hier nicht berücksichtigt, jedoch weist dieser insgesamt nur einen Anteil an der LTO-Phase von ca. 2 % auf.

2.6 Energiebilanz

2.6.1 Revision der Energiebilanzen 2003-2021

Eine wichtige Basis zur Bestimmung der verkehrsbedingten Emissionen ist der Energieverbrauch in Deutschland. Dieser wird von der AG Energiebilanzen (AG Energiebilanzen o.J.) statistisch erfasst und den verschiedenen Sektoren zugeordnet. Die Energiebilanz ist die Basis der Emissionsberichterstattung (Umweltbundesamt 2022) 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 außerdem 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.

Zum 31.03.2023 wurden die Energiebilanzen der Jahre 2003 bis 2021 revidiert. Die revidierten Bilanzen enthalten Änderungen bei den für den Verkehr relevanten Energieträgern sowohl in der Gesamtsumme für den Endenergieverbrauch als auch in der Aufteilung auf die Sektoren (siehe Tabelle 34). So gibt es für den Verkehr Abweichungen beim Dieselverbrauch zwischen

+4,1 % und -6,1 %, beim Benzin von +7,1% bis -3,4%. Bei Benzin werden die Abweichungen ab 2015 überlagert von der Anpassung des Heizwerts auf das Niveau der Vorjahre. Dabei wurde die bisherige Änderung des Heizwerts ab 2015 wieder rückgängig gemacht.

Der Verbrauch einzelner Sektoren mit geringem Anteil am Gesamtverbrauch hat sich z.T. sehr stark geändert, z. B. Dieselmotorkraftstoff in der Binnenschifffahrt, bei der insbesondere die sehr niedrigen Werte der Jahre 2007 und 2008 nach oben korrigiert wurden. Dagegen gab es beim Dieselmotorkraftstoff für den Schienenverkehr keine Änderungen. Große Änderungen gab es auch beim Benzinverbrauch von Haushalten, Gewerbe und Handel (nicht in der Tabelle dargestellt).

Einzelne Energieträger finden sich nun in Sektoren, in denen sie bisher nicht ausgewiesen waren, z.B. LPG und Ottokraftstoff in der Binnenschifffahrt. Die entsprechenden Mengen sind jedoch sehr gering und werden in TREMOD in der Datenübergabe für das ZSE für die Berichterstattung berücksichtigt.

Da zu den revidierten Energiebilanzen bisher keine Dokumentation gibt, lassen sich die Gründe für die Änderungen nur teilweise nachvollziehen. Bei den kleineren Sektoren fand offensichtlich z.T. eine Bereinigung der Verbrauchszahlen in der Zeitreihe statt, so dass die jetzigen Zahlen plausibler erscheinen. Bei den Gesamtverbrauchswerten für Diesel und Benzin lässt sich jedoch keine Systematik für die Anpassung erkennen.

Tabelle 34: Unterschied der revidierten Energiebilanzen 2003-2021 zu den bisherigen Werten

Differenz bezogen auf TJ

	Diesel Straße	Diesel Binnenschiff	Diesel Verkehr	Benzin Straße	Benzin Luft	Benzin Verkehr
2003	-4,0%	38,0%	-3,5%	0,3%	-0,1%	0,3%
2004	-6,8%	47,3%	-6,1%	-3,5%	0,0%	-3,4%
2005	-4,2%	54,6%	-3,4%	-1,0%	-0,1%	-1,0%
2006	2,9%	78,9%	3,6%	2,9%	-0,4%	3,0%
2007	-0,7%	145,9%	0,2%	-0,3%	-2,4%	-0,3%
2008	2,9%	256,7%	4,1%	3,0%	0,0%	3,0%
2009	-0,7%	40,9%	-0,2%	1,5%	0,1%	1,5%
2010	-2,2%	64,3%	-1,5%	-1,3%	-0,1%	-1,2%
2011	-2,2%	37,8%	-1,8%	-1,0%	0,1%	-1,0%
2012	-2,0%	48,1%	-1,5%	-1,5%	0,0%	-1,4%
2013	-2,7%	41,5%	-2,2%	-0,4%	0,0%	-0,4%
2014	-2,0%	34,1%	-1,6%	-5,1%	-0,1%	-5,1%
2015	-1,8%	19,3%	-1,6%	7,1%	3,0%	7,2%
2016	-2,4%	30,5%	-2,1%	6,1%	2,9%	6,1%
2017	-2,1%	46,9%	-1,7%	2,9%	3,1%	3,0%
2018	3,1%	39,5%	3,4%	3,5%	3,0%	3,5%
2019	0,2%	30,2%	0,5%	4,3%	2,9%	4,3%

	Diesel Straße	Diesel Binnenschiff	Diesel Verkehr	Benzin Straße	Benzin Luft	Benzin Verkehr
2020	1,8%	39,2%	2,1%	1,5%	3,0%	1,5%
2021	-1,0%	14,5%	-0,9%	0,6%	3,0%	0,6%

Anmerkung: ohne Biokraftstoffe

Quelle: AG Energiebilanzen, eigene Berechnungen

2.6.2 Ergänzung der Biokraftstoffe und Fortschreibung bis 2022

Neben der Energiebilanz werden die Amtlichen Mineralöldaten des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) verwendet (BAFA o.J.), da diese zeitnah veröffentlicht werden und Auskunft geben über den Absatz der Biokraftstoffe. Daraus kann der jährliche 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. Dies gilt auch für die in den revidierten Energiebilanzen neu ausgewiesenen Mengen der Binnenschifffahrt
- ▶ Beim Dieselmotorkraftstoff werden die nicht beigemischten Biokraftstoffe (FAME und Pflanzenöl) dem Straßenverkehr zugeordnet. Seit 2013 gingen diese mengenmäßig deutlich zurück und werden seit 2017 nicht mehr separat in der Statistik ausgewiesen. Der jährliche ermittelte Anteil der Beimischung von Biodiesel wird für die Sektoren Straße, Schiene und sonstige Verbraucher gleich angenommen. Damit wird berücksichtigt, dass die AG Energiebilanzen keine Biokraftstoffe in der Binnenschifffahrt ausweist.
- ▶ Der für den Straßenverkehr in den Energiebilanzen ausgewiesene Verbrauch für Erdgas enthält nach Aussagen des Umweltbundesamtes auch das Biomethan. Anders als bei Benzin und Diesel muss daher das Biomethan aus den Sattelitenbilanzen vom Erdgas abgezogen werden, um fossiles Erdgas und Biomethan separat zu bilanzieren.

Die so ermittelten Absatzzahlen nach Sektoren sind Basis der Emissionsberichterstattung für den Verkehrsbereich. In der folgenden Tabelle 35 ist der Kraftstoffabsatz für die Jahre 1990-2022 entsprechend der hier beschriebenen Zuordnung dargestellt.

Tabelle 35: Kraftstoffabsatz in Deutschland nach Energiebilanz 1990-2022

In PJ

Sektor	1990	2000	2010	2015	2019	2020	2021	2022
Straßenverkehr								
Dieselmotorkraftstoffe								
Diesel konventionell	736	1.108	1.143	1.324	1.394	1.262	1.241	1.246
Biodiesel Beimischung	0,0	0,0	76	73	79	103	87	87
Biodiesel (FAME)	0	12	11	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Pflanzenöl	0,0	0,0	2,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Biokraftstoffe gesamt	0	12	89	74	79	103	87	87

Sektor	1990	2000	2010	2015	2019	2020	2021	2022
Diesel Gesamt	736	1.120	1.232	1.398	1.473	1.365	1.328	1.332
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	1,1%	7,3%	5,3%	5,4%	7,6%	6,6%	6,5%
Ottokraftstoffe								
Otto konventionell	1.330	1.237	781	759	730	639	638	670
Bioethanol	0	0	30	31	30	29	30	31
Otto Gesamt	1.330	1.237	812	790	760	667	668	701
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	3,7%	3,9%	4,0%	4,3%	4,5%	4,4%
Andere Kraftstoffe								
Erdgas konventionell			8,5	4,6	2,4	2,9	3,7	3,1
Biomethan				1,2	2,4	3,2	3,5	3,8
LPG		0,1	23	19	15	10	10	12
Schieneverkehr								
Dieselmotorkraftstoffe								
Diesel konventionell	38	25	15	13	11	11	11	10
Biodiesel Beimischung	0,0	0,0	1,0	0,7	0,6	0,9	0,8	0,7
Diesel gesamt	38	25	16	14	11	12	12	11
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	6,3%	5,2%	5,4%	7,6%	6,6%	6,5%
Binnenschifffahrt								
Dieselmotorkraftstoffe								
Diesel konventionell	28	12	18	16	15	14	12	10
Biodiesel Beimischung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Diesel gesamt	28	12	18	16	15	14	12	10
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Sonstige Verbraucher								
Dieselmotorkraftstoffe								
Diesel konventionell	127	96	90	104	106	105	107	104
Biodiesel Beimischung	0,0	0,0	6,0	5,8	6,0	8,6	7,5	7,2
Diesel gesamt	127	96	96	110	112	114	115	111
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	6,3%	5,2%	5,4%	7,6%	6,6%	6,5%
Ottokraftstoffe								
Otto konventionell	30	17	18	15	14	14	14	14
Bioethanol	0,0	0,0	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7

Sektor	1990	2000	2010	2015	2019	2020	2021	2022
Otto Gesamt	30	17	19	16	15	14	15	15
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	3,7%	3,9%	4,0%	4,3%	4,5%	4,4%
Gesamt								
Dieselmotorkraftstoffe								
Diesel konventionell	929	1.242	1.266	1.458	1.526	1.392	1.371	1.370
Biodiesel Beimischung	0,0	0,0	83	80	86	113	95	94
Biodiesel (FAME)	0	12	11	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Pflanzenöl	0,0	0,0	2,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Biokraftstoffe gesamt	0	12	96	80	86	113	95	94
Diesel Gesamt	929	1.254	1.363	1.538	1.611	1.504	1.467	1.464
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	1,0%	7,1%	5,2%	5,3%	7,5%	6,5%	6,5%
Ottomotorkraftstoffe*								
Otto konventionell	1.361	1.254	800	775	744	653	652	685
Bioethanol	0,0	0,0	31	31	31	29	31	32
Otto Gesamt	1.361	1.254	831	806	775	682	683	716
Anteil Biokraftstoffe	1.361	1.254	800	775	744	653	652	685
Flugverkehr								
Kerosin (in PJ)	193	297	362	362	434	200	258	385
Flugbenzin (in PJ)	2,4	1,1	0,6	0,6	0,3	0,2	0,2	0,2

Anmerkungen: *Einschließlich Ottomotorkraftstoffe in der Binnenschifffahrt; ohne LPG in der Binnenschifffahrt (jährliche Mengen ab 2003 0,007 bis unter 0,008 PJ)

Quellen: AG Energiebilanzen, Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, eigene Berechnungen; Stand: 16. September 2023

2.6.3 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 für den Straßenverkehr und die Absatzmengen der AG Energiebilanzen sind in Tabelle 36 dargestellt.

Tabelle 36: Vergleich Verbrauch im Inland und Absatz für Benzin und Diesel im Straßenverkehr 1990-2022

In PJ

Jahr	Benzin- verbrauch im Inland	Benzinabsatz im Inland	Differenz Ab- satz/Verbrauch	Diesel- verbrauch im Inland	Dieselabsatz im Inland	Differenz Ab- satz/Verbrauch
1990	1.225	1.330	8,6%	720	736	2,3%
1991	1.229	1.332	8,4%	816	785	-3,8%
1992	1.247	1.344	7,8%	851	854	0,4%
1993	1.259	1.351	7,2%	867	908	4,7%
1994	1.240	1.277	3,0%	945	932	-1,4%
1995	1.243	1.300	4,6%	988	966	-2,3%
1996	1.248	1.300	4,2%	1.012	967	-4,5%
1997	1.253	1.297	3,6%	1.039	983	-5,4%
1998	1.274	1.300	2,1%	1.058	1.027	-3,0%
1999	1.277	1.301	1,8%	1.114	1.102	-1,1%
2000	1.243	1.237	-0,5%	1.152	1.120	-2,7%
2001	1.229	1.199	-2,5%	1.199	1.114	-7,1%
2002	1.206	1.166	-3,3%	1.238	1.126	-9,0%
2003	1.160	1.112	-4,1%	1.265	1.065	-15,8%
2004	1.132	1.037	-8,4%	1.326	1.074	-19,0%
2005	1.065	989	-7,2%	1.337	1.104	-17,4%
2006	1.033	971	-6,0%	1.386	1.243	-10,3%
2007	1.006	902	-10,4%	1.433	1.214	-15,3%
2008	971	896	-7,8%	1.426	1.249	-12,4%
2009	964	865	-10,3%	1.391	1.197	-13,9%
2010	944	812	-14,0%	1.426	1.232	-13,6%
2011	933	812	-13,0%	1.460	1.254	-14,1%
2012	903	764	-15,4%	1.466	1.285	-12,4%
2013	880	769	-12,6%	1.497	1.325	-11,5%
2014	869	738	-15,1%	1.548	1.350	-12,7%
2015	856	790	-7,7%	1.592	1.398	-12,2%
2016	847	783	-7,5%	1.638	1.434	-12,4%
2017	847	771	-9,0%	1.672	1.471	-12,0%
2018	850	748	-12,0%	1.688	1.500	-11,1%

Jahr	Benzinverbrauch im Inland	Benzinabsatz im Inland	Differenz Absatz/Verbrauch	Dieselverbrauch im Inland	Dieselabsatz im Inland	Differenz Absatz/Verbrauch
2019	861	760	-11,8%	1.685	1.473	-12,6%
2020	753	667	-11,3%	1.498	1.365	-8,9%
2021	742	668	-9,9%	1.517	1.328	-12,4%
2022	762	701	-8,0%	1.523	1.332	-12,5%

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

Quelle: TREMOD 6.51 vom 30.09.2023, AG Energiebilanzen, BAFA

Der Vergleich zeigt, dass der Inlandsverbrauch aller Kraftstoffe zwischen 1994 und 1999 nahe den Absatzzahlen oder darunter (Benzin) lag, ab 2000 über den Kraftstoffabsatz gestiegen ist und bis heute immer deutlich darüber liegt. 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 Treibhausgasemissionen des Verkehrs im nationalen Inventarbericht nach 2000 niedriger ausfällt als nach der Inlandsbilanzbilanzierung in TREMOD (siehe auch Kapitel 2.7.1.5).

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. Dazu werden Anpassungsfaktoren wie folgt ermittelt:

- ▶ Ottokraftstoff wird überwiegend von Pkw verbraucht, 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 als Quotient aus der verbleibenden Differenz zum gesamten Inlandsabsatz des Straßenverkehrs nach Energiebilanz (Absatz Energiebilanz minus dem auf den Absatz angepassten Verbrauch der Pkw, MZR, LNF und UeKfz) und dem berechneten Inlandsverbrauch der schweren Nutzfahrzeuge und Busse.
- ▶ Der Anteil der Beimischung von Biokraftstoffen wird für die Sektoren Straße, Schiene und übrige Verbraucher gleich angenommen. In der Binnenschifffahrt werden keine Biokraftstoffe getankt. Der Verbrauch an reinen Biokraftstoffen wird mangels genauer Informationen dem Straßenverkehr zugeordnet.
- ▶ Die Energiebilanz enthält neben der Binnenschifffahrt zusätzlich die Küstenschifffahrt. Im Emissionsinventar und den VEdV wird dieser Verbrauch der nationalen Binnenschifffahrt zugeordnet (Umweltbundesamt 2022). Der Anpassungsfaktor für den Dieselverbrauch der Binnenschifffahrt wird als Quotient aus dem Absatz von Dieselmotorkraftstoff der Küsten- und Binnenschifffahrt nach Energiebilanz und dem mit TREMOD berechneten Inlandsverbrauch

der Binnenschifffahrt (nur Güterverkehr) berechnet. Die nationale Seeschifffahrt ist nicht in TREMOD enthalten.

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 37: Anpassungsfaktoren Kraftstoffabsatz Energiebilanz / Inlandsverbrauch TREMOD 1990-2022

Absatz Energiebilanz / Inlandsverbrauch (in PJ/PJ)

	Straße, Kfz<=3,5t Otto+Diesel	Straße, Kfz>3,5t	Diesel Bahn	Diesel Binnen- schifffahrt
1990	1,09	0,98		
1991	1,08	0,89		
1992	1,08	0,96		
1993	1,07	1,03		
1994	1,03	0,96	1,05	1,14
1995	1,05	0,93	1,04	0,88
1996	1,04	0,90	1,03	0,85
1997	1,04	0,89	1,03	0,67
1998	1,02	0,94	1,05	0,60
1999	1,02	0,97	1,06	0,51
2000	1,00	0,96	1,08	0,45
2001	0,98	0,89	1,03	0,45
2002	0,97	0,86	1,13	0,40
2003	0,96	0,74	1,12	0,65
2004	0,92	0,71	1,06	0,71
2005	0,93	0,72	0,99	0,83
2006	0,94	0,85	0,96	0,85
2007	0,90	0,80	0,96	0,72
2008	0,92	0,83	0,89	0,85
2009	0,90	0,82	0,88	0,81
2010	0,86	0,87	0,88	0,86
2011	0,87	0,85	0,90	0,81
2012	0,85	0,91	0,83	0,85
2013	0,87	0,90	0,77	0,83
2014	0,85	0,90	0,82	0,82

	Straße, Kfz<=3,5t Otto+Diesel	Straße, Kfz>3,5t	Diesel Bahn	Diesel Binnen- schifffahrt
2015	0,92	0,82	0,87	0,82
2016	0,93	0,81	0,89	0,79
2017	0,91	0,84	0,72	0,78
2018	0,88	0,90	0,59	0,88
2019	0,88	0,86	0,73	0,87
2020	0,89	0,94	0,76	0,87
2021	0,90	0,85	0,78	0,72
2022	0,92	0,82	0,76	0,61

Quelle: TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

Mit der Revision der Energiebilanzen haben sich die Abweichungen zwischen Kraftstoffabsatz und Inlandsverbrauch, insbesondere im Straßenverkehr, verändert. Leider gibt es dabei keine neuen Trends, die den Unterschied besser erklären würden als bisher. Vielmehr gibt es nun teilweise ausgeprägte Sprünge, z.B. bei Ottokraftstoff von 2014 auf 2015 – hier war in den bisherigen Bilanzen eine Korrektur des Heizwerts enthalten; gleichzeitig wird nun 2015 ein starker Anstieg des Verbrauchs ausgewiesen statt des Rückgangs in den vorigen Bilanzen.

Da die Anpassungsfaktoren von Ottokraftstoff und somit auch der erwähnte Sprung bei der aktuellen Korrekturmethode für die leichten Dieselfahrzeuge übernommen werden, hat das unmittelbare Auswirkungen auf die Aufteilung des Dieselmotorkraftstoffs zwischen leichten und schweren Fahrzeugen. So entfällt etwa im Jahr 2015 deutlich weniger Dieselmotorkraftstoff auf die schweren Nutzfahrzeuge als bisher. Es sollte daher geprüft werden, ob diese Methode bei der Aktualisierung zukünftig so beibehalten werden soll oder angepasst werden kann.

2.7 Ergebnisse

2.7.1 Energieverbrauch und Emissionen

In diesem Kapitel werden ausgewählte Ergebnisse des Energieverbrauchs und der Emissionen des Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2022 dargestellt. Schwerpunkt sind die Ergebnisse für den Inlandsverkehr, wie sie mit TREMOD berechnet wurden. Eine Sonderstellung hat hierbei der Luftverkehr, welcher alle von Deutschland abgehenden und damit auch internationale Flüge beinhaltet.

2.7.1.1 Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs nach Energieträgern

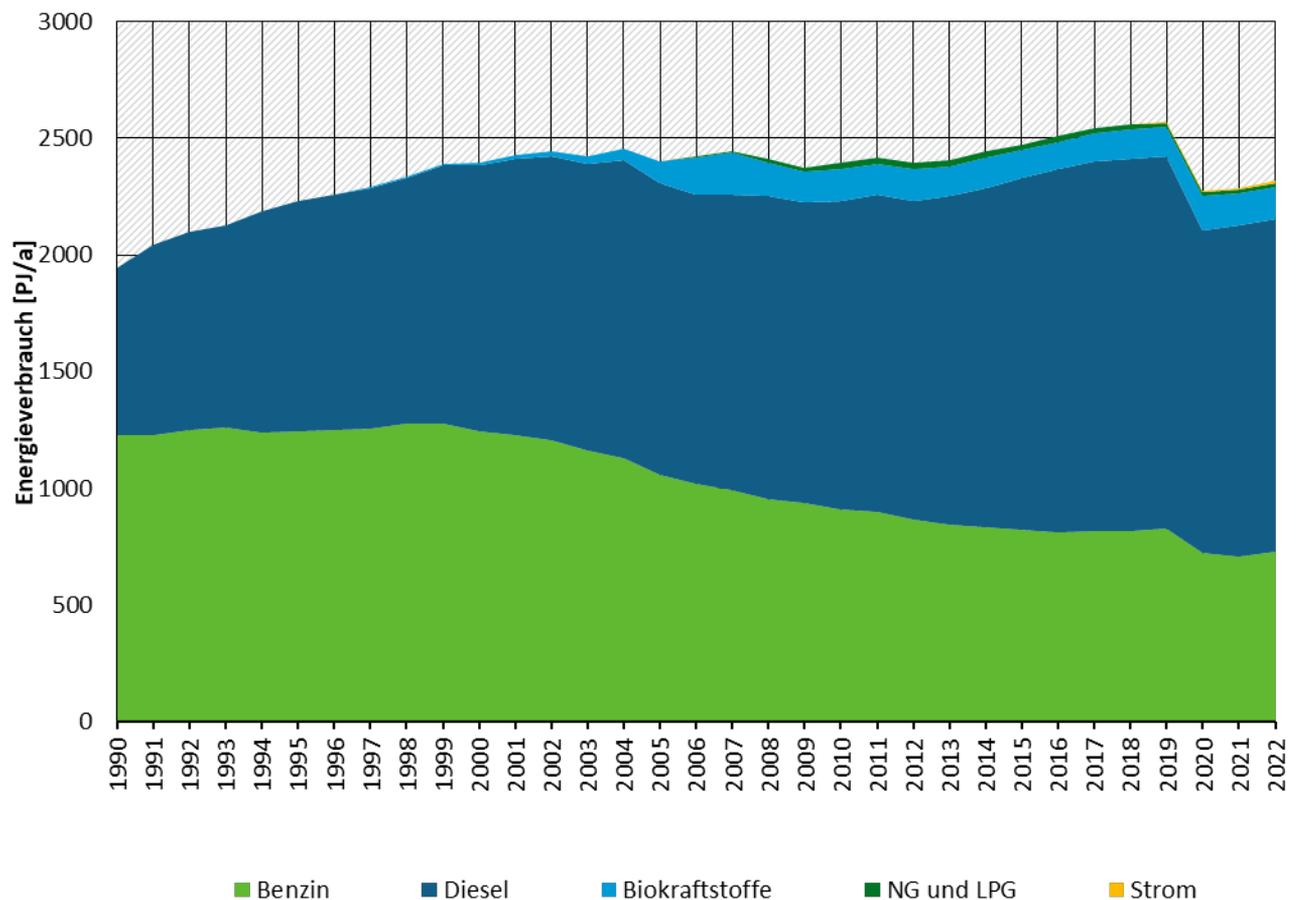
Abbildung 12 zeigt die Entwicklung des Energieverbrauchs des Straßenverkehrs in Deutschland auf inländischem Territorium unterschieden nach den Energieträgern Benzin (ohne Beimischung Bioethanol), Diesel (ohne Beimischung Biodiesel), Biokraftstoffe (Biodiesel, Bioethanol und Biogas), Erdgas (NG) und Flüssiggas (LPG) sowie Strom (Kraftfahrzeuge ohne Pedelecs). Danach zeigen sich bei den Energieträgern folgende Entwicklungen:

- Im Jahr 1990 dominierte der Verbrauch von Benzin. In den Folgejahren nahm der Dieselmotorkraftstoffverbrauch zu, während der Benzinverbrauch zunächst nahezu gleich blieb und ab dem Jahr 2000 zurückging. Der Dieselmotorkraftstoffverbrauch lag im Jahr 2019 um 122 % bzw. im Jahr 2022 um 98 % höher als im Jahr 1990.

- ▶ Seit 1995 kommen zunehmend Biokraftstoffe zum Einsatz, überwiegend als Beimischung zu den konventionellen Kraftstoffen. Bis 2019 erreichten sie einen Anteil von 5,0 % (2022: 6,0%) am Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs.
- ▶ NG und LPG haben über die gesamte Zeitreihe nur geringe Anteile am Energieverbrauch.
- ▶ Der Stromverbrauch im Straßenverkehr nahm in den letzten Jahren zu. Der Anteil am Energieverbrauch lag 2022 aber immer noch deutlich unter 1 %.

Insgesamt nahm der Energieverbrauch des Straßenverkehrs von 1990 bis 2019 um 32 % zu. Im Jahr 2020 sank der Energieverbrauch infolge der Auswirkungen der COVID-19 Pandemie und stieg bis 2022 wieder um 2% an.

Abbildung 12: Energieverbrauch des Straßenverkehrs in Deutschland nach Energieträgern - Entwicklung des Endenergieverbrauchs bis 2022



Anmerkungen: Endenergieverbrauch im Inland
 Quelle: TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

2.7.1.2 Endenergieverbrauch aller Verkehrsträger

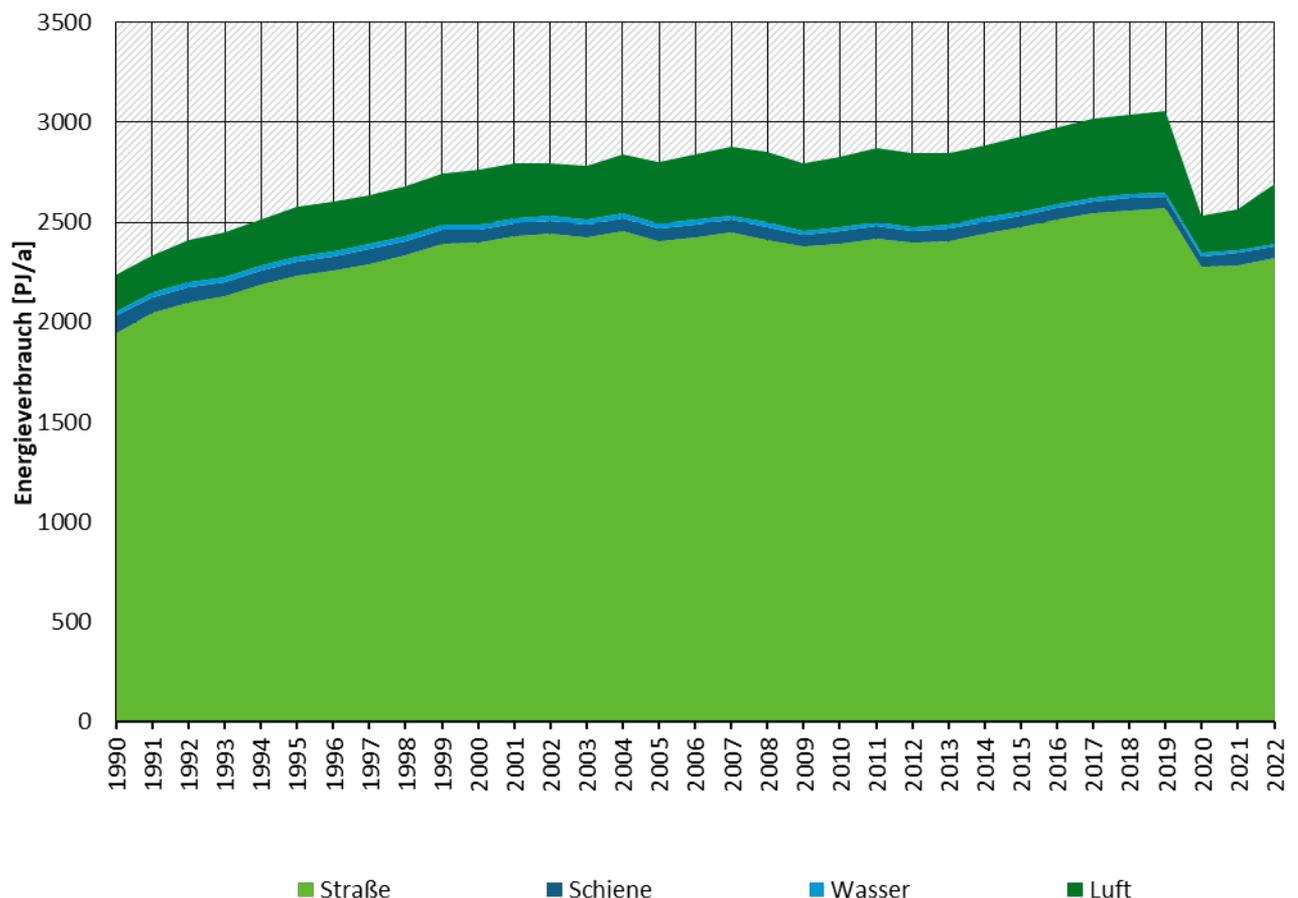
Abbildung 13 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2022 für die Verkehrsträger Straße (Straßenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen sowie Bussen auf inländischem Territorium),

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 86 % im Jahr 2022), gefolgt vom Flugverkehr. Der Energieverbrauch des Straßenverkehrs nahm von 1990 bis 2019 um 32 % bzw. bis 2022 um 19 % zu.
- ▶ Der Energieverbrauch des Flugverkehrs nahm von 1990 bis 2019 um 123 % zu. 2020 und 2021 gab es einen deutlichen pandemiebedingten Einbruch, gegenüber 2019 auf etwa die Hälfte. 2022 gab es wieder einen deutlichen Anstieg um 45 % gegenüber 2021.
- ▶ Bei der Bahn ging der Energieverbrauch von 1990 bis 2022 um 31 % zurück.
- ▶ Bei der Binnenschifffahrt ging der Energieverbrauch von 1990 bis 2022 um 33 % zurück.

Der gesamte Energieverbrauch aller betrachteten Verkehrsträger nahm von 1990 bis 2019 um 36 % bzw. bis 2022 um 20 % zu. Der pandemiebedingte Einbruch im Jahr 2020 äußert sich bei allen Verkehrsträgern, jedoch am stärksten beim Luftverkehr.

Abbildung 13: Energieverbrauch des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung des Endenergieverbrauchs bis 2022



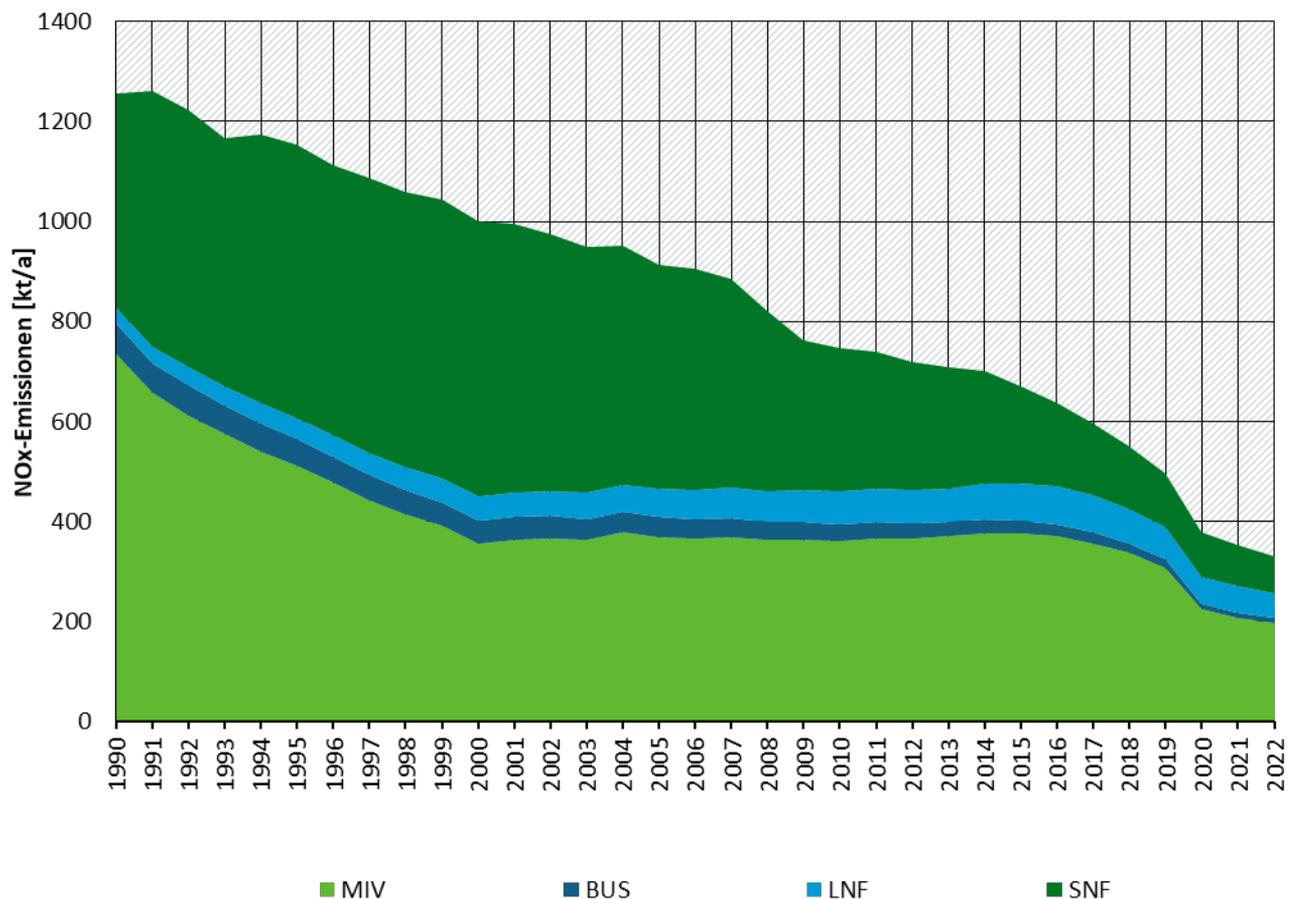
Anmerkungen: Endenergieverbrauch im Inland für Straße (Straßenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen sowie Bussen auf inländischem Territorium), Schiene (Eisenbahn, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen auf inländischem Territorium), Wasser (Güterverkehr mit Binnenschiffen auf inländischem Territorium) und Luft (von Deutschland abgehender Flugverkehr bis zur ersten Zwischenlandung).

Quelle: TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

2.7.1.3 Direkte Abgasemissionen des Straßenverkehrs

Abbildung 14 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 allem 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, c) zu einer Stagnation der Pkw-Emissionen bis 2016 führten. Insgesamt nahmen die Stickstoffoxidemissionen von 1.260 Kilotonnen im Jahr 1991 auf 496 Kilotonnen im Jahr 2019 und damit um 61 % ab. 2022 waren es noch 331 Kilotonnen und damit 33 % weniger als 2019.

Abbildung 14: Stickstoffoxidemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen bis 2022

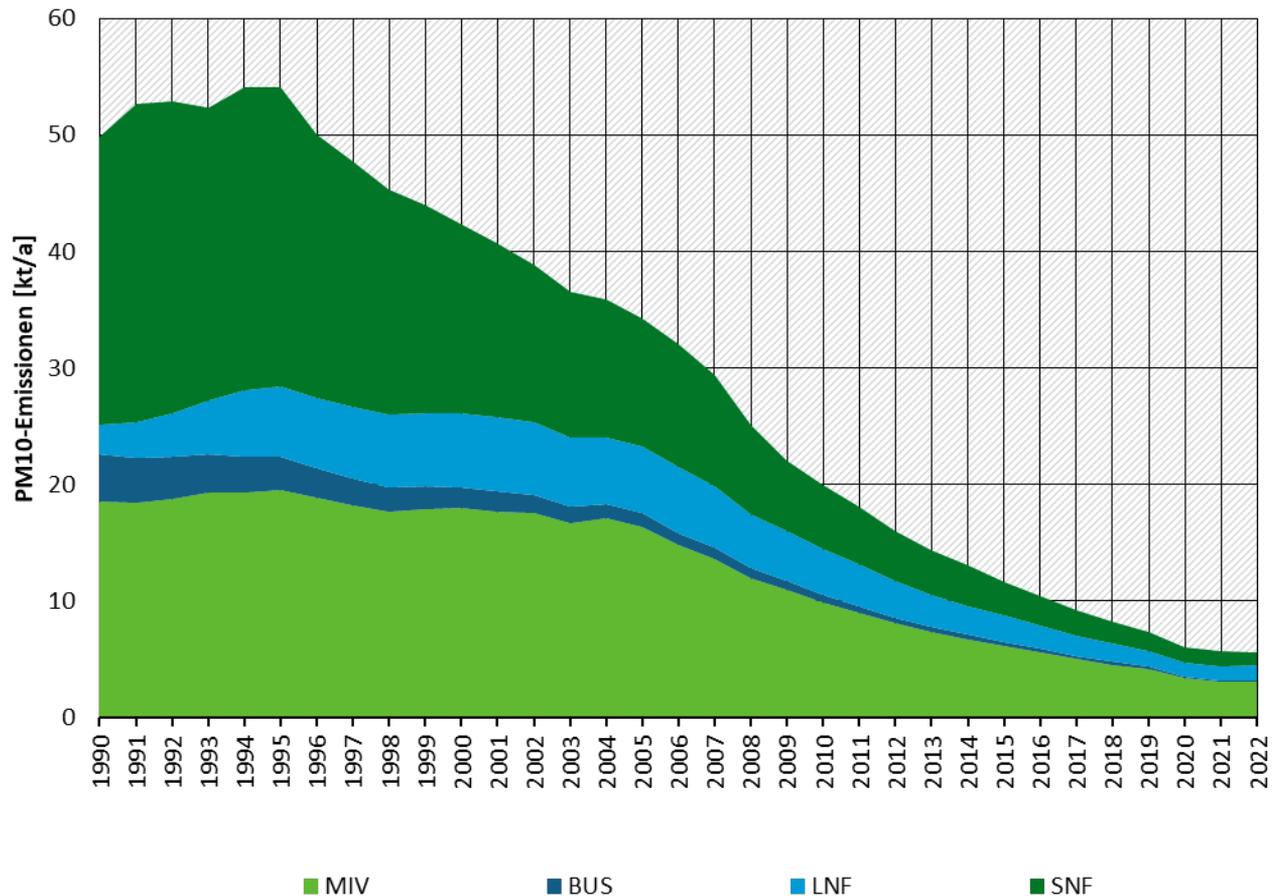


Anmerkungen: Direkte Abgasemissionen im Inland.

Quelle: TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

Abbildung 15 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 2005 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 1990 auf 7,4 Kilotonnen im Jahr 2019 und damit um 85 % ab. 2022 waren es mit 5,6 Kilotonnen 24 % weniger als 2019.

Abbildung 15: Abgaspartikelemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen bis 2022



Anmerkungen: Direkte Abgasemissionen im Inland
 Quelle: TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

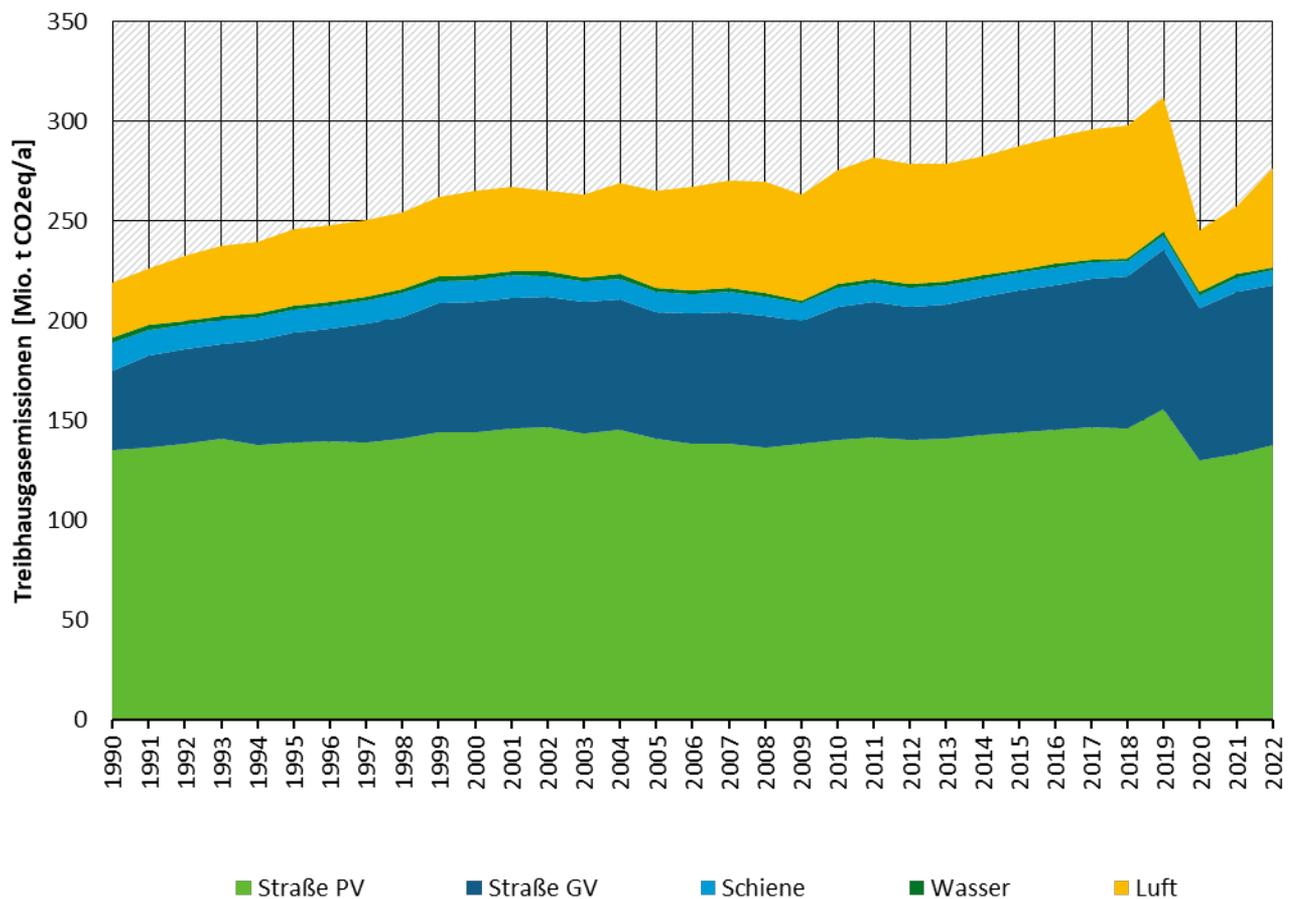
2.7.1.4 Treibhausgasemissionen des Verkehrs nach Territorialprinzip

Abbildung 16 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2022 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) 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 79 % Anteil im Jahr 2022), gefolgt vom Flugverkehr. Die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs nahmen von 1990 bis 2019 um 35 % und bis 2022 um 17 % zu.
- ▶ Der Flugverkehr nahm von 1990 bis 2019 um 143 % und bis 2022 um 78 % zu.
- ▶ Bei der Bahn gingen die Treibhausgasemissionen von 1990 bis 2022 um 48 % zurück.
- ▶ Bei der Binnenschifffahrt gingen die Treibhausgasemissionen von 1990 bis 2022 um 25 % zurück.

Die Treibhausgasemissionen nahmen insgesamt für alle betrachteten Verkehrsträger von 1990 bis 2019 um 33 % und bis 2022 um 26 % zu.

Abbildung 16: Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung der Gesamtemissionen bis 2022



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 Reise Flughöhe).

Quelle: TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

2.7.1.5 Treibhausgasemissionen des Verkehrs im nationalen Inventarbericht (NIR)

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

- ▶ Die Ermittlung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs erfolgt grundsätzlich auf Basis der in der Energiestatistik erfassten abgesetzten Kraftstoff- bzw. Energiemengen (sogenanntes Absatzprinzip).
- ▶ Die Schifffahrt umfasst den nationalen Seeverkehr¹ und die Binnenschifffahrt gemäß Energiebilanz. In TREMOD wird nur die Binnenschifffahrt mit Güterschiffen erfasst.
- ▶ Der Straßenverkehr enthält zusätzlich die CO₂-Emissionen aus der gewollten Mitverbrennung von im Zweitaktergemisch enthaltenen Schmierölen.² Diese sind nicht in TREMOD enthalten.
- ▶ Der Schienenverkehr enthält zusätzlich die Emissionen aus Festbrennstoffen. Diese sind in TREMOD nicht im Schienenverkehr enthalten sondern werden extra ausgewiesen.
- ▶ Beim Flugverkehr werden nur die Emissionen der Inlandsflüge als Teil der nationalen Gesamtemissionen erfasst. Die Emissionen der Flüge ins Ausland werden dagegen nur nachrichtlich ausgewiesen. Die zusätzliche Klimawirkung in großen Flughöhen wird bisher grundsätzlich nicht berücksichtigt.
- ▶ Zusätzlich werden unter der Quellgruppe „Other Transport“ die Emissionen von Gasturbinen in Erdgasverdichterstationen des Transportnetzes berücksichtigt.
- ▶ Die regenerativen CO₂-Emissionen der Biokraftstoffe werden separat berechnet, aber nicht den einzelnen Emittenten bzw. den nationalen Gesamtemissionen zugerechnet, sondern nur nachrichtlich ausgewiesen. Allerdings wird davon ausgegangen, dass bei der Produktion von für Bioethanol und Biodiesel geringe Mengen fossilen Kohlenstoffs in Form von Methanol eingebracht werden. Daher werden aktuell 6,66 % des Kohlendioxids aus Bioethanol und 5,50 % des Kohlendioxids aus Biodiesel als fossil betrachtet und, jeweils CRF-spezifisch als Emissionen aus „other fossil fuels“, in die nationalen Gesamtemissionen eingerechnet.

Mit dieser Abgrenzung unterscheiden sich die berichteten Emissionen in der Höhe und im Verlauf von den im Kapitel 2.7.1.4 dargestellten TREMOD-Ergebnissen.

Abbildung 17 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2021 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 (94 % im Jahr 1990 bis 96 % Anteil im Jahr 2019 und 97 % im Jahr 2022). Insgesamt lagen

¹ Emissionen aus „inländischen“ Fahrten mit Start und Ziel in einem deutschen Seehafen sind Teil der nationalen Gesamtemissionen. Dagegen werden die bei Fahrten ins Ausland anfallenden Emissionen nur nachrichtlich ausgewiesen (vgl. Flugverkehr).

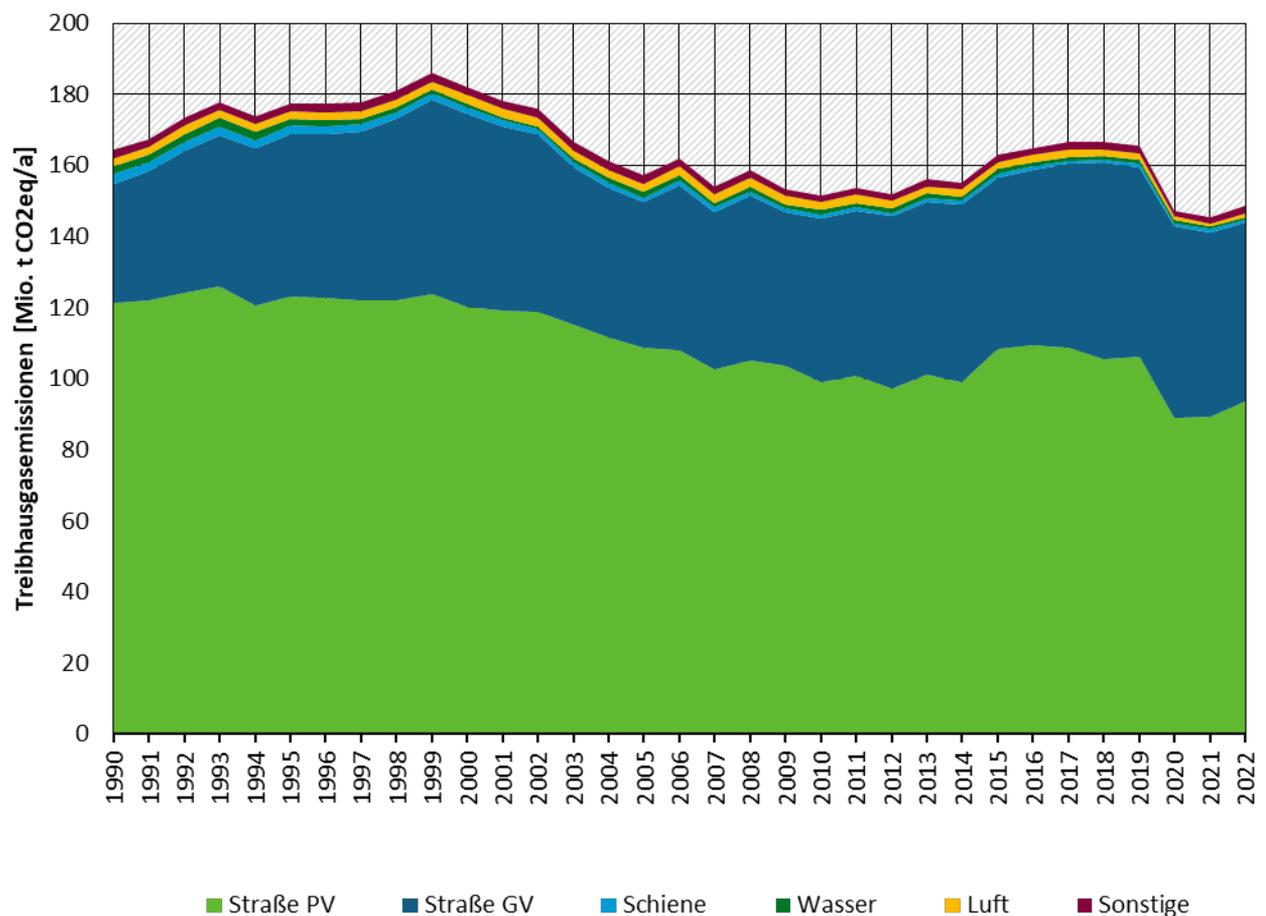
² Im Gegensatz dazu werden die CO₂-Emissionen aus der ungewollten Mitverbrennung in Nicht-Zweitaktern als Emissionen aus der Produktanwendung unter CRF-Kategorie 2.D.1 erfasst. Für Methan und Lachgas aus der gewollten wie ungewollten Schmierstoff-Mitverbrennung wird dagegen davon ausgegangen, dass diese bereits in den einzelnen Kraftstoff-spezifischen und auf Messungen beruhenden Emissionsfaktoren abgebildet sind.

die THG-Emissionen des Straßenverkehrs im Jahr 2019 um 3 % über dem Niveau von 1990 und 2022 um 7 % unter dem Niveau von 1990, während bei den THG-Gesamtemissionen in der TREMOD-Abgrenzung eine Steigerung um 35 % (2019) bzw. 24 % (2022) 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 2019 um 0,7 % gestiegen und bis 2022 um 10 % gesunken, während sie in der TREMOD-Abgrenzung um 42% bzw. bis 2022 um 26% angestiegen sind (siehe Kapitel 2.7.1.4). Die Unterschiede ergeben sich aus den bereits am Anfang des Kapitels genannten Gründen.

Abbildung 17: Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung bis 2022 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 6.51 vom 15.09.2023; Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 – 2022; Stand EU-Submission: 15.01.2024 (Umweltbundesamt 2024a)

2.7.2 Ursachen für Änderungen gegenüber der Version 6.43

In diesem Kapitel werden wichtige Ergebnisse der TREMOD-Versionen 6.51 vom 30.09.2023 dargestellt, erläutert und der vorigen Version 6.43 vom 31.03.2023 (Allekotte et al. 2023) gegenübergestellt. Im Fokus stehen hierbei die Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern sowie die Entwicklung

der Stickstoffoxid- und Partikelemissionen bis zum Jahr 2022. Die Ergebnisse für das Jahr 2022 wurden in TREMOD 6.43 im Rahmen der VEdV 2022 im März 2023 erstellt und in TREMOD 6.51 für das Inventar 2022 aktualisiert (siehe Bericht zur Methodenentwicklung für die VEdV³). Die wesentlichen Unterschiede zwischen VEdV 2022 und Inventar 2022 werden im nachfolgenden Kapitel 2.7.3 dargestellt.

2.7.2.1 Fahrleistungen Straßenverkehr

In TREMOD 6.51 haben sich die Fahrleistungen gegenüber TREMOD 6.43 2022 nur geringfügig geändert (siehe Kapitel 2.2.2). Im Jahr 2021 ergeben sich lediglich bei den Bussen nach Veröffentlichung der statistischen Daten von DESTATIS eine Änderung um fast +10 %, die sich auch in der Fortschreibung 2022 bemerkbar machen. Die Fahrleistungen der Busse 2022 sind außerdem vorläufig, da die Statistiken erst später erscheinen (siehe Kapitel 2.2.2).

Die Fahrleistungen der übrigen Fahrzeugkategorien liegen in TREMOD 6.51 im Jahr 2022 sehr nahe an den VEdV-Werten. Die Änderungen resultieren aus den Änderungen im Verkehrsbarometer gegenüber den ersten Ergebnissen für die VEdV sowie aus einer methodischen Korrektur bei den Lkw.

Tabelle 38: Vergleich der TREMOD-Version 6.51 gegenüber TREMOD 6.43 – Fahrleistungen

Unterschied Gesamtfahrleistung nach Fahrzeugkategorien und gesamt in Prozent

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990-2020	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2021	0,0%	0,0%	0,0%	9,7%	0,0%	0,0%	0,0%
2022	0,1%	0,1%	0,1%	12,8%	0,0%	-0,1%	-0,4%

Quelle: TREMOD 6.43 vom 31.03.2023 und TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

2.7.2.2 Energieverbrauch Straßenverkehr

Der Energieverbrauch hat sich bei allen Fahrzeugkategorien nur minimal geändert. Wesentlicher Grund für die Änderungen ab 2015 ist die erneute Änderung des Heizwerts bei Ottokraftstoff auf den ursprünglichen und bis 2014 verwendeten Wert. Bei den Bussen wirkt sich ab 2021 die Verschiebung der Fahrleistungsanteile je Buskategorie aus (höhere Anteile der Fernlinien- und sonstigen Busse). Die folgende Tabelle zeigt die Änderung des spezifischen Energieverbrauchs der TREMOD-Version 6.51 gegenüber TREMOD Version 6.43 je Fahrzeugkategorie.

³ Verbesserung der Vorjahresschätzung der Klimagasemissionen des Verkehrssektors, Projektnummer 146 566; im Auftrag des Umweltbundesamtes, Abschluss bevorstehend

Tabelle 39: Vergleich der TREMOD-Version 6.51 gegenüber TREMOD 6.43 – spezifischer Energieverbrauch

Unterschied spezifischer Energieverbrauch in MJ/km nach Fahrzeugkategorien und gesamt in Prozent

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990-2014	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2015	1,0%	1,5%	3,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%
2016	1,0%	1,5%	3,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%
2017	1,0%	1,5%	3,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%
2018	1,0%	1,5%	3,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%
2019	1,0%	1,5%	3,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%
2020	1,0%	1,5%	3,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%
2021	1,2%	1,4%	3,3%	-0,7%	0,4%	0,5%	0,6%
2022	1,3%	1,7%	2,5%	-0,8%	0,1%	0,3%	0,3%

Quelle: TREMOD 6.43 vom 31.03.2023 und TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

Der gesamte Energieverbrauch des Inlandsverkehrs ergibt sich aus dem Produkt der Fahrleistungen und der spezifischen Energieverbrauchswerte (Tabelle 40).

Tabelle 40: TREMOD-Version 6.51 – gesamter Energieverbrauch Inland

In PJ

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	1.945	1.400	21	55	62	381	25
1991	2.045	1.419	20	54	69	455	26
1992	2.098	1.453	20	54	76	467	28
1993	2.127	1.484	17	51	86	457	31
1994	2.185	1.480	18	50	97	503	37
1995	2.231	1.491	19	49	106	529	37
1996	2.260	1.496	20	49	113	543	38
1997	2.292	1.497	22	49	120	567	38
1998	2.332	1.516	23	49	127	580	38
1999	2.391	1.540	24	48	136	605	39
2000	2.395	1.533	24	48	143	609	37
2001	2.428	1.558	24	49	150	608	40
2002	2.444	1.573	25	49	151	607	40
2003	2.425	1.549	25	49	149	614	40
2004	2.457	1.578	25	50	147	617	40

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2005	2.403	1.537	25	51	149	601	40
2006	2.425	1.543	25	52	152	633	21
2007	2.447	1.546	25	52	153	651	20
2008	2.413	1.527	24	53	151	640	18
2009	2.376	1.548	24	54	150	581	18
2010	2.394	1.548	23	54	150	600	18
2011	2.418	1.562	22	55	150	611	18
2012	2.397	1.552	22	55	151	600	18
2013	2.404	1.555	21	54	152	606	18
2014	2.445	1.574	21	55	161	617	18
2015	2.475	1.584	22	57	169	626	17
2016	2.510	1.598	22	59	177	638	17
2017	2.544	1.610	22	58	184	654	16
2018	2.561	1.608	22	58	190	668	16
2019	2.569	1.617	22	58	195	661	16
2020	2.274	1.371	22	38	184	645	14
2021	2.286	1.356	20	41	196	658	15
2022	2.319	1.392	21	48	200	645	14

Quelle: TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

Die Änderung des Inlandsverbrauchs der TREMOD-Version 6.41 gegenüber der Version 6.21 ist in Tabelle 41 dargestellt.

Tabelle 41: Vergleich der TREMOD-Version 6.51 gegenüber TREMOD 6.43 – Energieverbrauch Inland

Unterschied gesamter Energieverbrauch in PJ nach Fahrzeugkategorien und gesamt in Prozent

Jahr	EV gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990-2014	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2015	1,01%	1,53%	2,98%	0,00%	0,13%	0,00%	0,14%
2016	0,99%	1,50%	2,98%	0,00%	0,12%	0,00%	0,13%
2017	0,97%	1,49%	2,98%	0,00%	0,12%	0,00%	0,12%
2018	0,97%	1,50%	2,98%	0,00%	0,13%	0,00%	0,12%
2019	0,98%	1,51%	2,98%	0,00%	0,13%	0,00%	0,12%
2020	1,00%	1,55%	2,98%	0,01%	0,14%	0,12%	0,13%
2021	1,19%	1,39%	3,33%	8,96%	0,39%	0,54%	0,58%

Jahr	EV gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2022	1,39%	1,80%	2,67%	11,87%	0,09%	0,24%	-0,06%

Quelle: TREMOD 6.43 vom 31.03.2023 und TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

Die beiden folgenden Tabelle zeigen den Energieverbrauch nach Absatzprinzip (Grundlage der VEDv und des Inventars). In Tabelle 42 sind die neuen Absatzzahlen dargestellt, die sich in TREMOD 6.51 nach Revision der Energiebilanzen ergeben. Die nachfolgende Tabelle 43 zeigt die Änderungen gegenüber der Vorversion vor Revision der Energiebilanzen.

Tabelle 42: TREMOD-Version 6.51 – gesamter Energieverbrauch Absatz

In PJ

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	2.066	1.521	22	54	68	375	26
1991	2.117	1.539	22	49	75	406	27
1992	2.198	1.566	21	52	82	447	29
1993	2.258	1.592	19	53	92	470	33
1994	2.209	1.524	18	48	100	482	36
1995	2.265	1.559	20	46	111	493	37
1996	2.267	1.559	21	44	117	487	37
1997	2.281	1.550	22	43	124	504	37
1998	2.327	1.547	23	46	130	545	38
1999	2.403	1.568	24	47	138	587	39
2000	2.357	1.525	24	46	143	583	37
2001	2.314	1.520	24	43	146	543	37
2002	2.293	1.521	24	42	146	523	37
2003	2.178	1.486	24	36	143	455	34
2004	2.113	1.448	23	36	134	439	33
2005	2.095	1.427	23	37	139	435	34
2006	2.225	1.455	23	45	144	540	18
2007	2.133	1.394	22	43	138	520	16
2008	2.170	1.418	22	45	139	530	16
2009	2.094	1.401	21	45	135	476	15
2010	2.076	1.341	20	48	130	522	16
2011	2.098	1.368	19	47	132	517	15
2012	2.079	1.318	18	51	128	548	16
2013	2.125	1.364	18	49	133	545	16

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2014	2.117	1.340	18	50	137	556	16
2015	2.213	1.462	20	47	156	514	14
2016	2.241	1.477	20	48	163	518	15
2017	2.263	1.464	20	48	167	549	14
2018	2.271	1.417	19	52	167	601	14
2019	2.254	1.427	19	50	172	571	14
2020	2.052	1.215	19	36	163	605	13
2021	2.019	1.221	18	34	177	557	12
2022	2.063	1.282	19	39	184	528	12

Quelle: TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

Tabelle 43: Vergleich der TREMOD-Version 6.51 gegenüber TREMOD 6.43 – Energieverbrauch Absatz

Unterschied gesamter Energieverbrauch in PJ nach Fahrzeugkategorien und gesamt in Prozent

Jahr	EV gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990-2002	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2003	-1,8%	0,3%	0,3%	-8,1%	0,3%	-8,1%	-3,0%
2004	-5,1%	-3,4%	-3,4%	-10,1%	-3,4%	-10,1%	-6,1%
2005	-2,7%	-1,0%	-1,0%	-7,6%	-1,0%	-7,6%	-3,7%
2006	2,7%	3,0%	2,9%	2,0%	2,9%	2,1%	2,3%
2007	-0,2%	-0,2%	-0,3%	-0,2%	-0,3%	-0,2%	-0,2%
2008	3,0%	3,0%	2,9%	3,1%	2,9%	3,2%	3,1%
2009	0,2%	1,4%	1,4%	-3,0%	1,4%	-3,2%	-1,9%
2010	-1,6%	-1,2%	-1,3%	-2,7%	-1,3%	-2,8%	-2,4%
2011	-1,7%	-1,0%	-1,0%	-3,2%	-1,0%	-3,4%	-2,7%
2012	-1,9%	-1,7%	-1,5%	-2,9%	-1,6%	-2,4%	-2,2%
2013	-1,9%	-0,6%	-0,5%	-5,4%	-0,6%	-4,9%	-3,8%
2014	-3,1%	-5,1%	-5,0%	1,1%	-5,1%	2,1%	0,2%
2015	1,0%	5,1%	6,8%	-9,6%	3,5%	-8,7%	-5,3%
2016	0,4%	4,3%	5,8%	-9,4%	2,7%	-8,9%	-5,7%
2017	-0,5%	1,2%	2,8%	-5,6%	-0,4%	-4,5%	-3,2%
2018	3,0%	1,8%	3,3%	5,5%	0,3%	6,4%	4,9%
2019	1,3%	2,4%	4,1%	-2,3%	0,8%	-1,0%	-0,3%
2020	1,3%	-0,2%	1,4%	2,7%	-1,9%	5,4%	3,7%

Jahr	EV gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2021	-0,8%	-1,1%	1,0%	5,5%	-2,4%	0,0%	-0,2%
2022	0,5%	0,4%	1,4%	10,0%	-1,7%	1,1%	0,5%

Quelle: TREMOD 6.43 vom 31.03.2023 und TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

Durch die Revision ändern sich alle Werte ab dem Jahr 2003. Die Änderungen zeigen keine eindeutige Richtung. Es lässt sich lediglich feststellen, dass die Heizwertänderung bei Benzin ab 2015 zu einer systematischen Erhöhung führt. Mangels Dokumentation seitens der AGEBA lassen sich keine Aussagen zu den Ursachen der Änderungen treffen.

2.7.2.3 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. Erst ab ca. 2015 sinken die Werte unter das Niveau der Vorjahre (Tabelle 44).

Tabelle 44: TREMOD-Version 6.51 – NO_x-Emissionsfaktoren

In g/km

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	2,230	1,485	0,145	14,412	2,119	11,925	3,093
1991	2,180	1,303	0,174	14,785	2,090	11,815	3,090
1992	2,064	1,178	0,203	15,121	2,066	11,733	3,063
1993	1,926	1,079	0,201	14,943	2,030	11,416	3,162
1994	1,918	1,012	0,207	14,513	1,872	11,615	3,472
1995	1,847	0,941	0,208	13,746	1,802	11,152	3,402
1996	1,756	0,872	0,207	13,027	1,760	10,578	3,301
1997	1,696	0,804	0,208	12,504	1,723	10,278	3,236
1998	1,620	0,739	0,209	12,125	1,671	10,004	3,171
1999	1,557	0,679	0,206	11,716	1,595	9,800	3,116
2000	1,484	0,616	0,199	11,425	1,514	9,552	2,962
2001	1,447	0,617	0,201	11,101	1,468	9,304	3,102
2002	1,399	0,613	0,199	10,717	1,466	8,914	3,038
2003	1,371	0,611	0,200	10,221	1,487	8,532	2,940
2004	1,348	0,624	0,198	10,108	1,522	8,268	2,932
2005	1,317	0,620	0,194	9,884	1,548	7,993	2,885
2006	1,300	0,620	0,195	9,561	1,571	7,587	4,163
2007	1,256	0,621	0,190	9,200	1,600	6,900	4,000
2008	1,172	0,615	0,183	8,714	1,636	5,978	3,826
2009	1,079	0,607	0,174	8,401	1,660	5,382	3,695

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2010	1,049	0,599	0,169	7,940	1,673	5,000	3,520
2011	1,022	0,599	0,165	7,558	1,685	4,640	3,350
2012	0,990	0,597	0,160	6,920	1,679	4,355	3,217
2013	0,970	0,598	0,154	6,568	1,674	4,120	3,086
2014	0,939	0,599	0,150	6,219	1,658	3,727	2,953
2015	0,887	0,591	0,144	5,790	1,640	3,158	2,770
2016	0,828	0,574	0,140	5,295	1,596	2,623	2,588
2017	0,765	0,549	0,136	4,689	1,484	2,204	2,288
2018	0,705	0,519	0,130	4,146	1,340	1,882	2,003
2019	0,632	0,471	0,124	3,724	1,205	1,618	1,767
2020	0,556	0,403	0,117	3,454	1,066	1,412	1,587
2021	0,518	0,375	0,111	3,040	0,975	1,264	1,520
2022	0,470	0,342	0,105	2,705	0,886	1,157	1,377

Quelle: TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

Tabelle 45 stellt die Unterschiede der Stickstoffoxidemissionsfaktoren der TREMOD-Version 6.51 gegenüber der Version 6.43 dar. Relevante Unterschiede gibt es nur in den Jahren 2021 und 2022. Die geringen Unterschiede beim Pkw ab 2010 resultieren aus einer Neuordnung von Euro-4-Diesel-Pkw (siehe nachfolgendes Kapitel 2.7.2.4), die sich vor allem auf die Abgaspartikelemissionen und in sehr geringem Umfang auch auf die Stickstoffoxidemissionen auswirkt. Im Jahr 2022 ergibt sich ein weiterer Unterschied aus der Modellierung: Die in der Version 6,43 mit dem Umschichtungsmodell berechneten Fahrzeugbestände unterschätzen systematisch den Bestand der älteren Fahrzeuge mit sehr hohen spezifischen Emissionen, deren Anteil sich demnach im Realbestand regelmäßig als höher herausstellt als in der Modellierung. Die Emissionen liegen dadurch bei der Berechnung des Inventars regelmäßig höher als bei der Szenarienrechnung für das gleiche Jahr. Dieser Effekt tritt auch bei den Partikelemissionen auf (siehe nachfolgendes Kapitel 2.7.2.4).

Tabelle 45: Vergleich der TREMOD-Version 6.51 gegenüber TREMOD 6.43 – spezifische NO_x-Emissionsfaktoren

Unterschied spezifische NO_x-Emissionen in g/km nach Fahrzeugkategorien und gesamt in Prozent

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990-2009	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2010	0,01%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2011	0,02%	0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2012	0,02%	0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2013	0,02%	0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2014	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2015	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2016	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2017	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2018	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2020	0,02%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2021	0,22%	-0,32%	-0,75%	0,66%	1,07%	-0,12%	6,44%
2022	4,03%	4,47%	-0,18%	4,26%	1,28%	3,73%	2,01%

Quelle: TREMOD 6.51 vom 30.09.2023 und TREMOD 6.43 vom 31.03.2023

Tabelle 46 zeigt die mit TREMOD Version 6.51 berechneten 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 bis 2014 gestoppt worden. Erst danach gingen sie weiter zurück.

Tabelle 46: TREMOD-Version 6.51 – NO_x-Emissionen des Straßenverkehrs im Inland

In kt

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	1.256	725	2	60	30	422	15
1991	1.260	647	2	60	33	502	16
1992	1.223	601	3	60	35	507	17
1993	1.165	563	2	58	38	484	20
1994	1.175	530	2	56	40	523	24
1995	1.155	500	3	54	42	533	24
1996	1.112	467	3	51	44	525	23
1997	1.086	432	3	50	45	533	23
1998	1.059	405	3	48	46	533	23
1999	1.044	379	3	47	48	544	23
2000	1.001	345	3	46	48	537	21
2001	995	352	3	45	49	521	23
2002	976	355	3	44	51	500	23
2003	949	351	3	42	52	479	22
2004	951	366	3	42	54	463	23
2005	912	356	3	41	56	434	22
2006	906	360	3	40	58	433	13

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2007	884	363	3	38	61	407	12
2008	821	357	3	37	63	351	11
2009	763	359	3	35	64	291	11
2010	748	357	3	34	66	279	10
2011	740	362	2	32	67	267	10
2012	718	362	2	30	67	247	9
2013	709	366	2	28	68	236	9
2014	701	373	2	27	71	219	8
2015	671	373	2	26	74	189	8
2016	636	366	2	24	76	161	7
2017	595	353	2	21	74	139	6
2018	550	333	2	19	70	121	5
2019	495	304	2	17	65	103	5
2020	379	221	2	10	54	88	4
2021	354	204	1	10	53	81	4
2022	331	193	2	10	50	73	3

Quelle: TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

Tabelle 47 zeigt die Differenz der Stickstoffoxidemissionen der Version 6.51 gegenüber der Version 6.43. Die Unterschiede sind ähnlich wie bei den spezifischen Stickstoffoxidemissionen.

Tabelle 47: Vergleich der TREMOD-Version 6.51 gegenüber TREMOD 6.43 –NO_x-Emissionen des Straßenverkehrs im Inland

Unterschied gesamte Emissionen in kt nach Fahrzeugkategorien und gesamt in Prozent

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990-2009	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2010	0,01%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2011	0,02%	0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2012	0,02%	0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2013	0,02%	0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2014	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2015	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2016	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2017	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2018	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2019	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2020	0,02%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2021	0,27%	-0,32%	-0,75%	10,45%	1,07%	-0,12%	6,44%
2022	4,13%	4,53%	-0,05%	17,58%	1,31%	3,62%	1,65%

Quelle TREMOD 6.51 vom 30.09.2023 und TREMOD 6.43 vom 31.03.2023

2.7.2.4 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 48 zeigt die Entwicklung der spezifischen Emissionen im betrachteten Zeitraum für alle Fahrzeugkategorien.

Tabelle 48: TREMOD-Version 6.51 – Abgas-Partikel-Emissionsfaktoren (in g/km)

In PJ

Jahr	g/km	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	0,088	0,031	0,136	0,953	0,183	0,675	0,393
1991	0,091	0,031	0,113	0,928	0,201	0,625	0,390
1992	0,089	0,032	0,090	0,915	0,217	0,602	0,392
1993	0,086	0,032	0,093	0,846	0,239	0,571	0,387
1994	0,088	0,033	0,087	0,777	0,267	0,554	0,350
1995	0,086	0,032	0,084	0,718	0,262	0,513	0,334
1996	0,079	0,031	0,083	0,641	0,245	0,436	0,307
1997	0,074	0,030	0,079	0,586	0,234	0,388	0,289
1998	0,069	0,028	0,077	0,537	0,224	0,346	0,274
1999	0,066	0,028	0,077	0,486	0,211	0,309	0,260
2000	0,063	0,028	0,075	0,443	0,201	0,276	0,248
2001	0,059	0,027	0,071	0,408	0,192	0,252	0,250
2002	0,056	0,026	0,072	0,365	0,180	0,229	0,236
2003	0,053	0,025	0,070	0,330	0,168	0,213	0,222
2004	0,051	0,025	0,072	0,304	0,160	0,201	0,215
2005	0,049	0,025	0,073	0,282	0,158	0,191	0,211
2006	0,046	0,023	0,073	0,254	0,154	0,177	0,202
2007	0,042	0,021	0,074	0,229	0,140	0,155	0,183
2008	0,036	0,018	0,076	0,196	0,122	0,125	0,160
2009	0,031	0,016	0,080	0,178	0,111	0,106	0,150

Jahr	g/km	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2010	0,028	0,014	0,079	0,155	0,101	0,093	0,136
2011	0,025	0,013	0,079	0,138	0,090	0,081	0,123
2012	0,022	0,011	0,078	0,107	0,079	0,072	0,113
2013	0,020	0,010	0,079	0,095	0,067	0,065	0,102
2014	0,017	0,009	0,078	0,086	0,057	0,056	0,093
2015	0,015	0,008	0,078	0,078	0,049	0,047	0,083
2016	0,014	0,007	0,077	0,070	0,041	0,039	0,075
2017	0,012	0,006	0,076	0,061	0,035	0,033	0,066
2018	0,011	0,005	0,076	0,052	0,030	0,028	0,058
2019	0,009	0,005	0,076	0,046	0,026	0,024	0,051
2020	0,009	0,004	0,077	0,039	0,024	0,021	0,045
2021	0,008	0,004	0,076	0,034	0,023	0,018	0,042
2022	0,008	0,003	0,076	0,032	0,023	0,016	0,038

Quelle: TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

Im Vergleich mit der Version 6.43 gibt es nur geringe Unterschiede Sie ergeben sich vor allem aus einer Korrektur bei den Flottenzusammensetzungen der Diesel-Pkw, Stufe Euro-4 mit Partikelfilter ab dem Jahr 2010: Es wurden in TREMOD 6.51 Fahrzeuge des Baujahres 2010 ergänzt, die in allen Vorversionen als Euro-4-Fahrzeuge ohne Partikelfilter angenommen wurden. Dadurch vermindert sich der durchschnittliche Emissionsfaktor der Pkw um ca. 3% in allen Jahren ab 2010. Im Jahr 2022 wird dieser Effekt durch die höheren Anteile älterer Fahrzeugschichten im Realbestand gegenüber der Szenarienmodellierung überkompensiert (siehe Beschreibung in Kapitel 2.7.2.3). Tabelle 49 zeigt die Unterschiede.

Tabelle 49: Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 – spezifische Abgas-Partikel-Emissionsfaktoren

Unterschied Emissionsfaktoren in g/km nach Fahrzeugkategorien und gesamt in Prozent

Jahr	Mittel	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990-2009	0,0%	0,0%	n.a.	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2010	-0,5%	-1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2011	-1,1%	-2,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2012	-1,1%	-2,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2013	-1,2%	-2,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2014	-1,2%	-2,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2015	-1,3%	-3,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2016	-1,4%	-3,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2017	-1,4%	-3,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Jahr	Mittel	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2018	-1,4%	-3,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2019	-1,4%	-3,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2020	-1,2%	-3,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2021	-0,9%	-3,6%	0,1%	0,9%	0,7%	-0,1%	5,2%
2022	4,1%	6,1%	0,1%	11,9%	2,3%	6,0%	1,0%

TREMOD 6.51 vom 30.09.2023 und TREMOD 6.43 vom 31.03.2023

Die Abgas-Partikelemissionen gehen über den gesamten Zeitraum entsprechend den Verbesserungen bei den spezifischen Emissionen zurück. Tabelle 50 zeigt die Entwicklung für den betrachteten Zeitraum für die verschiedenen Fahrzeugkategorien.

Tabelle 50: TREMOD-Version 6.51 –Abgas-Partikel-Emissionen des Straßenverkehrs im Inland

In kt

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	49,8	15,2	2,1	4,0	2,6	23,9	1,9
1991	52,7	15,6	1,6	3,8	3,1	26,5	2,1
1992	52,9	16,2	1,1	3,7	3,7	26,0	2,2
1993	52,3	16,8	1,1	3,3	4,5	24,2	2,4
1994	54,1	17,0	1,0	3,0	5,7	24,9	2,4
1995	54,0	17,2	1,0	2,8	6,1	24,5	2,3
1996	50,1	16,6	1,1	2,5	6,1	21,7	2,2
1997	47,7	16,0	1,1	2,3	6,1	20,1	2,1
1998	45,3	15,4	1,1	2,1	6,2	18,5	2,0
1999	44,0	15,5	1,1	1,9	6,3	17,1	1,9
2000	42,3	15,7	1,1	1,8	6,4	15,5	1,8
2001	40,7	15,5	1,1	1,7	6,5	14,1	1,9
2002	38,8	15,3	1,1	1,5	6,3	12,8	1,8
2003	36,6	14,6	1,1	1,4	5,9	11,9	1,7
2004	35,9	14,9	1,1	1,3	5,7	11,3	1,7
2005	34,2	14,2	1,1	1,2	5,7	10,4	1,6
2006	32,0	13,5	1,1	1,1	5,6	10,1	0,6
2007	29,4	12,3	1,2	1,0	5,3	9,1	0,6
2008	25,1	10,6	1,2	0,8	4,7	7,3	0,5
2009	22,1	9,6	1,3	0,8	4,3	5,8	0,4
2010	20,0	8,6	1,2	0,7	4,0	5,2	0,4

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2011	18,1	7,7	1,2	0,6	3,6	4,7	0,3
2012	16,0	6,8	1,1	0,5	3,2	4,1	0,3
2013	14,4	6,1	1,1	0,4	2,7	3,7	0,3
2014	13,0	5,5	1,1	0,4	2,5	3,3	0,3
2015	11,7	5,0	1,1	0,3	2,2	2,8	0,2
2016	10,4	4,4	1,1	0,3	2,0	2,4	0,2
2017	9,2	3,9	1,1	0,3	1,7	2,1	0,2
2018	8,2	3,4	1,1	0,2	1,5	1,8	0,2
2019	7,4	3,0	1,1	0,2	1,4	1,6	0,1
2020	6,1	2,2	1,1	0,1	1,2	1,3	0,1
2021	5,7	2,0	1,0	0,1	1,3	1,2	0,1
2022	5,6	1,9	1,1	0,1	1,3	1,0	0,1

Quelle: TREMOD 6.51 vom 30.09.2023

Gegenüber der TREMOD-Version 6.43 sind die Abgas-Partikelemissionen vor allem aufgrund der beschriebenen Umordnung der Euro-4-Pkw unterschiedlich (Tabelle 51). Es ergeben sich daher ähnliche Relationen wie bei den Emissionsfaktoren

Tabelle 51: Vergleich der TREMOD-Version 6.51 gegenüber TREMOD 6.43 –Abgas-Partikel-Emissionen des Straßenverkehrs im Inland

Unterschied gesamte Emissionen in kt nach Fahrzeugkategorien und gesamt in Prozent

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990-2009	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2010	-0,5%	-1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2011	-1,1%	-2,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2012	-1,1%	-2,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2013	-1,2%	-2,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2014	-1,2%	-2,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2015	-1,3%	-3,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2016	-1,4%	-3,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2017	-1,4%	-3,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2018	-1,4%	-3,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2019	-1,4%	-3,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2020	-1,2%	-3,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2021	-0,9%	-3,6%	0,1%	10,7%	0,7%	-0,1%	5,2%

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2022	4,2%	6,2%	0,2%	26,2%	2,3%	5,9%	0,6%

TREMOD 6.51 vom 30.09.2023 und TREMOD 6.43 vom 31.03.2023

2.7.3 Vergleich der VEdV mit dem Inventar 2022

In diesem Kapitel liegt der Schwerpunkt auf den Unterschieden der Eingangsdaten und Ergebnisse des THG-Inventars des Verkehrs im Jahr 2022.

2.7.3.1 Entwicklung der Absatzzahlen und der Aufteilung in die Quellkategorien für das Jahr 2022

In diesem Abschnitt werden die Absatzzahlen des Jahres 2022, die am Jahresanfang 2023 für die VEdV und zur Jahresmitte 2023 für das Inventar verwendet wurden, gegenübergestellt. Diese stammen aus den folgenden Quellen:

- ▶ VEdV 2022: AMS, vorläufige Daten vom 24.02.2023 sowie eigene Annahmen zur Aufteilung in die Kategorien, abgeschlossen am 03.03.2023.
- ▶ Inventar 2022: TREMOD-Ergebnisse auf Grundlage der vorläufigen Energiebilanz 2022 vom 16.09.2023. Diese ist in der Tabelle separat aufgeführt, da im Endenergieverbrauch noch Verbräuche der Kategorie Bergbau etc. (EBZ 60) aufgeführt sind, die in den VEdV bisher nicht berücksichtigt wurden. Diese sollten zukünftig ebenfalls in die VEdV einbezogen werden.

Die nachfolgende Tabelle 52 stellt die Ergebnisse für den Dieselabsatz dar. Die Biokraftstoffe sind hier nicht enthalten, da diese bei der AG Energiebilanzen nicht differenziert ausgegeben werden.

Tabelle 52: Dieselkraftstoffabsatz im Jahr 2022 nach Kategorien in den VEdV und im Inventar ohne Bioanteile (physikalische Einheiten)

Dieselmkraftstoff konv. (TJ)	EBZ	VEdV 2022	Inventar 2022	Inventar vs. VEdV
Bergbau, Steine u. Erden, Verarbeit. Gew.	60		1083	
Schienenverkehr	61	10.854	10.464	-3,6%
Straßenverkehr	62	1.242.878	1.245.609	0,2%
Luftverkehr	63			
Küsten- und Binnenschifffahrt	64	10.219	9.819	-3,9%
Verkehr insgesamt	65	1.263.951	1.265.892	0,2%
Haushalte	66			
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	67	102.394	102.720	0,3%
Summe (ohne EBZ 60)		1.366.345	1.368.612	0,2%

Quellen: VEdV 2022 vom 06.03. 2023; Inventar 2022: AG Energiebilanzen, Vorläufige Energiebilanz vom 16.09.2023

Folgende Ergebnisse lassen sich festhalten:

- ▶ Der fossile Dieselabsatz lag nach der vorläufigen Energiebilanz 2022 um 0,2 % höher als bei den VEdV.

- Es zeigt sich, dass die größte Unsicherheit bei den VEdV in der Zuordnung auf die Quellkategorien liegt, insbesondere auf Schienenverkehr und Schifffahrt. Der Unterschied fiel 2022 geringer aus als 2021.
- Die nachfolgende Tabelle 53 zeigt die Ergebnisse für den Benzinabsatz, ebenfalls ohne Biokraftstoffe.

Tabelle 53: Ottokraftstoffabsatz im Jahr 2022 nach Quellkategorien in den VEdV und im Inventar ohne Bioanteile (physikalische Einheiten)

Ottokraftstoff konv.(TJ)	EBZ	VEdV 2022	Inventar 2022	Inventar vs. VEdV
Bergbau, Steine u. Erden, Verarbeit. Gew.	60			
Schienenverkehr	61			
Straßenverkehr	62	656.853	670.318	+2,0%
Luftverkehr	63			
Küsten- und Binnenschifffahrt	64		275	
Verkehr insgesamt	65	656.853	670.593	+2,1%
Haushalte	66	3.100	3.233	+4,3%
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	67	8.512	10.872	+27,7%
Summe (ohne EBZ 60)		668.466	684.698	+2,4%

Quellen: VEdV 2022 vom 06.03. 2023; Inventar für 2022: AG Energiebilanzen, Vorläufige Energiebilanz vom 16.09.2023;

Beim Benzinabsatz ist eine Zunahme der Gesamtmengen im Inventar für 2022 gegenüber den VEDV 2022 festzustellen: +2,4 % Allerdings wird diese Änderung durch die Anpassung des Heizwerts für Ottokraftstoff durch die AGEB in den revidierten Energiebilanzen verursacht und gibt daher nicht die tatsächlichen Unterschiede wieder. Auf Kraftstoffmasse bezogen (natürliche Einheit) ergibt sich ein Rückgang von -0,5 % (siehe Tabelle 54). Dieser Rückgang ist entscheidend für die Entwicklung der CO₂-Emissionen, die sich in gleicher Größenordnung unterscheiden.

Deutliche Verschiebungen gab es auch beim Ottokraftstoff zwischen den Quellkategorien. So ist der Verbrauch (in natürlichen Einheiten) von GHD in der Energiebilanz um 24 % höher als in den VEdV. Dadurch ergibt sich für den Straßenverkehr eine Differenz von -0,9 %⁴.

Tabelle 54: Ottokraftstoffabsatz im Jahr 2022 nach Quellkategorien in den VEdV und im Inventar ohne Bioanteile (natürliche Einheiten)

Ottokraftstoff konv. (kt)	EBZ	VEdV 2022	Inventar 2022	Inventar vs. VEdV
Bergbau, Steine u. Erden, Verarbeit. Gew.	60			
Schienenverkehr	61			
Straßenverkehr	62	15.535	15.394	-0,9%
Luftverkehr	63			

⁴ Die revidierten Energiebilanzen verwenden nun für alle Jahre einen einheitlichen Heizwert von 43,543 MJ/kg.

Ottokraftstoff konv. (kt)	EBZ	VEdV 2022	Inventar 2022	Inventar vs. VEdV
Küsten- und Binnenschifffahrt	64		6	
Verkehr insgesamt	65	15.535	15.401	-0,9%
Haushalte	66	73	74	1,3%
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	67	201	250	24,0%
Summe (ohne EBZ 60)		15.810	15.725	-0,5%

Quellen: VEdV 2022 vom 06.03.2023; Inventar für 2022: AG Energiebilanzen, Vorläufige Energiebilanz vom 16.09.2023;

Die nachfolgende Tabelle 55 zeigt schließlich die Absatzzahlen der Biokraftstoffe, die der VEdV 2022 und dem Inventar für 2022 zugrunde gelegt wurden. Die Entwicklung der Gesamtmengen reflektiert in diesem Fall die Unterschiede der AMS vorläufig (Stand: Februar 2023) und der aktualisierten endgültigen AMS (Stand: August 2023). Die Aufteilung in die Kategorien folgt in Anlehnung auf die Aufteilung der konventionellen Kraftstoffe.

Tabelle 55: Absatz Biokraftstoffe im Jahr 2022 nach Quellkategorien (VEdV und Inventar)

Absatz in TJ	EBZ	VEdV 2022	Inventar 2022	Inventar vs. VEdV
Biodiesel				
Schienenverkehr	61	750	727	-3,0%
Straßenverkehr	62	85.861	86.559	+0,8%
Verkehr insgesamt	65	86.611	87.286	+0,8%
Haushalte	66			
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	67	7.074	7.213	+2,0%
Summe (ohne EBZ 60)		93.685	94.500	+0,9%
Bioethanol				
Straßenverkehr	62	31.065	31.067	+0,0%
Küsten- und Binnenschifffahrt	64	0	13	
Verkehr insgesamt	65	31.065	31.080	+0,0%
Haushalte	66	147	150	+2,2%
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	67	403	504	+25,2%
Summe (ohne EBZ 60)		31.614	31.733	+0,4%

Quellen: VEdV 2022 vom 06.03.2023, basierend auf AMS vorläufig vom 24.02.2023; Inventar 2021 basierend auf AMS (BAFA Dezember 2022 vom 16.08.23, endgültig) und AG Enbil vorläufig vom 16.09.2023

2.7.3.2 THG-Emissionen des Verkehrs 2022 in den VEdV und im Inventar

Die Ergebnisse des Treibhausgasinventars für den Gesamtverkehr im Vergleich zu den VEdV sind in Tabelle 56 dargestellt. Insgesamt sind die THG-Emissionen im Inventar um 0,4% niedriger als in den VEdV. Hauptursache ist der geringere Verbrauch an Benzin, den die vorläufige Energiebilanz 2022 der AG Energiebilanzen gegenüber den Werten der AMS (Stand Februar

2023) für 2022 aufweist und die den geringfügig höheren Dieserverbrauch überkompensiert. Der stärkere Unterschied der Sektoren Bahn und Schifffahrt und im Flugverkehr haben wenig Einfluss auf die Differenz der Gesamtbilanz.

Tabelle 56: THG-Emissionen des Verkehrs 2022 in den VEdV und im Inventar

Kategorie	2021 Inventar	2022 VEdV	2022 Inventar	Inventar vs. VEdV
4 – Verkehr	146.786	147.857	147.283	-0,4%
CRF 1.A.3.a - nationaler Luftverkehr	741	1.030	1.042	+1,2%
CRF 1.A.3.b – Straßenverkehr	143.724	144.541	144.033	-0,4%
CRF 1.A.3.c – Schienenverkehr	856	839	810	-3,5%
CRF 1.A.3.d - Küsten- & Binnenschiff- fahrt	1.466	1.447	1.397	-3,5%

Quellen: 2021 Inventar und 2022 VEdV: (Umweltbundesamt 2023), 2022 Inventar: (Umweltbundesamt 2024b)

3 Vorläufige Emissionsdaten des Vorjahrs (VEdV 2023)

In diesem Kapitel wird das Vorgehen zur Ermittlung der VEdV 2023 beschrieben, die nach KSG bis zum 15. März 2024 berichtet werden mussten (Umweltbundesamt 2024c). Es folgt der Methode, die im Rahmen der Studie (Allekotte et al. 2023) entwickelt wurde. Basis der Berichterstattung der Treibhausgasemissionen (THG) in den VEdV nach KSG sind die „Amtlichen Mineralöl- und Gasemissionsdaten“ (AMS), die vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA o.J.) herausgegeben werden, da die Energiebilanz, die die Grundlage des Emissionsinventars ist (siehe Kapitel 2.6), zu diesem frühen Zeitpunkt noch nicht vorliegt. 2024 wurde die Jahresstatistik 2023 der AMS von der BAFA vorab intern zur Verfügung gestellt, eine Veröffentlichung vor dem 15. März erfolgte nicht.

Die amtlichen Mineralöl- und Gasemissionsdaten liefern, anders als die Energiebilanz, keine vollständige sektorale Aufteilung, weswegen die Kraftstoffabsätze für die einzelnen Verkehrsarten und andere Quellkategorien mittels verschiedener Kennzahlen abgeschätzt werden müssen. Da der Straßenverkehr der Sektor mit dem weitaus größten Anteil am Verbrauch von Benzin und Diesel ist, werden zunächst die Mengen ermittelt, die auf die übrigen Sektoren entfallen. Der Energieverbrauch des Straßenverkehrs ergibt sich dann als Differenz aus dem Gesamtabsatz je Energieträger und den Summen aus den übrigen Sektoren.

3.1 Mobile Quellen in den Kategorien Haushalte, Bauwirtschaft, Landwirtschaft, GHD und Militär

Für die nationalen Emissionsinventare werden die Endenergieverbräuche für die Haushalte, GHD und Militär aus der Energiebilanz (AG Energiebilanzen o.J.), genauer: Energiebilanzzeilen (EBZ) 66 – Haushalte und 67 - Gewerbe, Handel, Dienstleistungen u. übrige Verbraucher entnommen.

EBZ 67 beinhaltet dabei neben den an das Militär abgesetzten (und in den AMS separat ausgewiesenen) Mengen auch die Land- (1.A.4.c ii (i)), Forst- (1.A.4.c ii (ii)) und Bauwirtschaft (1.A.2.g vii) sowie GHD (1.A.4.a ii). Die Aufteilung in diese Untergruppen erfolgt bisher proportional zum u.a. auf Basis von Bestandsdaten und jährlichen Betriebsstunden berechneten Energieverbrauch im Modell TREMOD-MM.

Sowohl die Energiebilanz als auch aktuelle Eingangsdaten für TREMOD-MM liegen für die Vorjahres-schätzung nicht rechtzeitig vor. Jedoch existieren zu diesem Zeitpunkt bereits verschiedene Struktur- und Konjunkturdaten für einzelne Kategorien. Für die VEdV 2023 wurden folgende Daten untersucht:

Tabelle 57: Statistische Kenndaten zur Entwicklung der Kategorien Bau-, Land- und Forstwirtschaft

Kategorie	Kenngröße	Einheit	2022	2023	2023/2022	Zeitraum
Bauwirtschaft	Auftragseingang Hoch+Tiefbau	Volumenindex (2015=100)	113,5	108,5	-4,4%	Jan-Dez
	Arbeitsstunden Bauhauptgewerbe	Mio. Stunden	620,7	617,5	-0,5%	Jan-Dez
Landwirtschaft	Anbaufläche	Mio. ha	10,04	9,96	-0,8%	Jan-Dez

Kategorie	KenngroÙe	Einheit	2022	2023	2023/2022	Zeitraum
	Ertragsmen- gen	Mio. t	144,0	150,2	+4,3%	Jan-Dez
Forstwirt- schaft	Holzeinschlag gesamt	Mio. m³	78,7	n.a.	n.a.	Jan-Dez

Quelle: DESTATIS, BMEL und eigene Berechnungen

In der Bauwirtschaft zeigt sich ein deutlicher Rückgang im Jahr 2023 gemessen am Auftragseingang, bei den Arbeitsstunden hingegen ein leichter Rückgang. Analog zur Vorgehensweise in (Allekotte et al. 2023) wird eine Regressionsfunktion verwendet, wonach aufgrund der Auftragsentwicklung für das Jahr 2023 der Dieserverbrauch im Jahr 2023 um ca. 2% gegenüber 2022 sinkt.

Auch in der Landwirtschaft gibt es gegenläufige Entwicklungen bei den Erntemengen und der Anbaufläche. Hier wurde eine Regressionsfunktion zwischen dem Dieserverbrauch der Landwirtschaft gemäß AG Energiebilanzen⁵ und dem landwirtschaftlichen Ernteertrag gebildet. Fortgeschrieben mit der Ertragsentwicklung für das Jahr 2023 steigt der Dieserverbrauch im Jahr 2023 um ca. 1% gegenüber 2022.

Für die Bereiche GHD und Haushalte wurden keine aktuellen oder keine geeigneten Statistiken ausgemacht. Diese Verbraucher haben allerdings nur einen sehr geringen Anteil an den Kraftstoffabsätzen. Daher wurden die Energieeinsätze aus dem Inventar des Jahres 2022 übernommen.

Die Kraftstoffmengen für das Militär werden hingegen in den Amtlichen Mineralöldata direkt ausgewiesen und können übernommen werden.

3.2 Flugverkehr

Für die nationalen Emissionsinventare werden die Endenergieverbräuche des Flugverkehrs aus der Energiebilanz (AG Energiebilanzen o.J.), Energiebilanzzeile (EBZ) 63 – *Luftverkehr* entnommen. Die „Amtlichen Mineralöldata“ liefern diese Werte bereits Ende Februar als vorläufige Werte, die für die VEDV verwendet werden können. Da im Inventar und in den VEDV nur die Emissionen des zivilen nationalen Luftverkehrs (1.A.3.a) bilanziert werden, muss der nationale Anteil des Energieverbrauchs ermittelt werden.

Die Berechnung der Emissionen folgt der gleichen Logik wie beim Inventar (siehe Kapitel 2.5.2). Es gibt nur geringe Unterschiede bei der Datenverfügbarkeit. Das Vorgehen ist wie folgt:

Da DESTATIS die **Sonderauswertung** für den gewerblichen Flugverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen bereits Ende Februar liefern kann, kann die Berechnung in den VEDV identisch zu den nationalen Emissionsinventaren erfolgen.

Ausgenommen hiervon ist der sonstige Flugverkehr, dessen Verkehrsmengen nicht rechtzeitig über die **Genesis-Datenbank** abgerufen werden können. Der sonstige Flugverkehr wird für die VEDV konstant auf dem Niveau des Vorjahres angenommen, aber da der sonstige Flugverkehr bzgl. der THG-Emissionen keine hohe Relevanz hat, sind die Abweichungen zwischen den nationalen Emissionsinventaren und den VEDV sehr gering.

Die Verbrauchs- und Emissionsfaktoren, die über den **Master emission calculator** und anderen Quellen, wie die *Aircraft Engine Emissions Databank* und die *FOCA Datenbanken*, stehen auch für

⁵ siehe Auswertungstabellen der AG Energiebilanzen, welche sich auf Erhebungen im Rahmen der Energiesteuerentlastung für Agrardiesel stützen

die VEdV zur Verfügung, sodass hier i. d. R. keine nennenswerten Unterschiede zwischen der Datenverfügbarkeit bei den VEdV und den nationalen Emissionsinventaren vorliegen.

Wie beim Inventar werden mit TREMOD-AV die Verbrauchsmengen und Emissionen für den Flugverkehr differenziert für den nationalen und den abgehenden internationalen Flugverkehr berechnet. Die Ergebnisse für den nationalen Flugverkehr werden direkt in die VEdV übernommen. Die Differenz aus dem Gesamtabsatz und Verbrauch nationaler Flüge und die daraus berechneten THG-Emissionen werden im Inventar nachrichtlich als Internationaler ziviler Luftverkehr berichtet.

In der folgenden Tabelle werden die Verkehrsmengen des gewerblichen Flugverkehrs auf den Hauptverkehrsflughäfen für die Jahre 2022 und 2023 angegeben. Durch die Corona-Pandemie kam es 2020 zu einem starken Einbruch des nationalen und internationalen Flugverkehrs. Im Jahr 2021 verringerte sich der nationale Flugverkehr weiter, wogegen der internationale Flugverkehr wieder stieg. Der Güterverkehr (GV) war hingegen kaum von der Pandemie betroffen. In den Jahren 2022 und 2023 stiegen sowohl im nationalen als auch im internationalen Personenverkehr (PV) die Verkehrsleistungen erneut an, jedoch liegen die Werte weiterhin unterhalb des Niveaus des Jahres 2019.

Tabelle 58: Starts, Flugzeug-km und Verkehrsleistung des gewerblichen Flugverkehrs auf den Hauptverkehrsflughäfen 2022 und 2023

		2022	2023
Anzahl Starts	National	187,3 (34%)	190,0 (1%)
[1.000 Starts]	International	608,4 (57%)	665,6 (9%)
Flugzeug-km ¹	National	55,4 (47%)	58,2 (5%)
[Mio. km]	International	1.195,0 (49%)	1.322,3 (11%)
Verkehrsleistung PV	National	4,1 (98%)	4,9 (20%)
[Mrd. Pkm]	International	172,7 (125%)	213,5 (24%)
Verkehrsleistung GV	National	50,0 (-2%)	46,2 (-8%)
[Mio. tkm]	International	13.131,9 (-1%)	12.406,8 (-5%)

Quellen: DESTATIS-Sonderauswertung. Anmerkungen: Werte in Klammern geben die Änderung zum Vorjahr an. ¹Distanz nach Großkreisentfernung.

3.3 Nationaler Schiffsverkehr

Die THG-Emissionen des nationalen Schiffsverkehrs (1.A.3.d) werden auf Basis der in den Energiebilanzzeilen (EBZ) 6 – *Hochseebunkerungen* und 64 – *Küsten- und Binnenschifffahrt* erfassten Kraftstoff-Inlandsablieferungen ermittelt.

Die auf den nationalen Seeverkehr, also Fahrten zwischen deutschen Seehäfen, entfallenden Teilmengen werden dabei als spezifische Verbräuche am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie modelliert. Die Berechnung der THG-Emissionen erfolgt hier also verbrauchsbasiert.

Die THG-Emissionen der Binnenschifffahrt werden dagegen auf Basis der in EBZ 64 ausgewiesenen Energiemengen berechnet.

Die sich nach Abzug der für nationale Seeverkehre ermittelten Energiemengen von den in EBZ 6 erfassten Gesamtmengen ergebenden Restmengen werden anschließend vollständig den von

deutschen Seehäfen abgehenden *internationalen* Seeverkehren zugewiesen, deren Emissionen jedoch nicht Teil des deutschen Treibhausgas-Inventares sind.

Zum Zeitpunkt der Erstellung der VEdV liegt die Energiebilanz für das Vorjahr noch nicht vor. Deshalb wurde wie folgt vorgegangen:

Binnenschifffahrt:

Für die Fortschreibung des Energieverbrauchs der *Fahrgastschifffahrt* lagen keine Daten für das Jahr 2023 vor. Daher wird angenommen, dass sich der Dieserverbrauch nicht ändert. Für die *Güterschifffahrt* nahmen die Verkehrsleistungen im Zeitraum Januar bis November um ca. 6 % gegenüber 2022 ab (Destatis o.J.). Diese Abnahme wurde vereinfacht auch auf den Dieserverbrauch der Güterschifffahrt übernommen. In Summe ergibt sich für die nationale Binnenschifffahrt eine Reduktion des Dieserverbrauchs um 5% im Jahr 2023 gegenüber 2022.

Nationaler Seeverkehr:

Für den nationalen Seeverkehr wurden keine eigenen Analysen durchgeführt, da dessen Verbräuche für die nationalen Emissionsinventare vom BSH ermittelt werden. Laut Angaben des BSH gab es zum Zeitraum der VEdV keine aktuellen Informationen, weshalb die Verbrauchswerte für 2023 aus 2022 übernommen wurden.

3.4 Schienenverkehr

Die THG-Emissionen des Schienenverkehrs (1.A.3.c) stützen sich in den nationalen Emissionsinventaren auf die in EBZ 61 – *Schienenverkehr* auf die für den Einsatz von Dieseldieselkraftstoff ausgewiesenen Energiemengen.⁶ Da die Energiebilanz für die VEdV noch nicht vorliegt, wird der Kraftstoffverbrauch aus der zum Jahresanfang bekannten Verkehrsentwicklung abgeschätzt.

Die DB AG erfasst den Dieserverbrauch ihrer Zugleistungen und für das Rangieren. Die Daten für 2023 wurden von der DB AG zur Verfügung gestellt, ebenso wie die Fahrplandaten zu den Zugleistungen des gesamten Eisenbahnverkehrs. Eine vollständige Statistik der Verkehrsleistungen des Jahres 2023 lag bis Ende Februar 2024 nicht vor. Eine Abschätzung auf Basis von Quartals- und Monatsstatistiken ist jedoch möglich.

Mit diesen Informationen wurde der Dieserverbrauch der Eisenbahnen 2023 wie folgt abgeschätzt:

- ▶ Der Dieserverbrauch sowie die Betriebs- und Verkehrsleistungen der DB AG für die Verkehrsbereiche Personennah-, -fern- und Güterverkehr sowie Rangieren werden von der DB AG übernommen. Der Anteil der Dieseldieseltraktion war bei der DB im Personen- und Güterverkehr etwas rückläufig. Eine ähnliche Entwicklung gab es nach den Fahrplandaten auch bei den NE-Verkehren.
- ▶ Die Verkehrsleistung im Personenfernverkehr wird überwiegend von der DB AG erbracht. Sie wird daher direkt aus den DB-Daten übernommen. Die gesamte Verkehrsleistung des Schienenpersonenfernverkehrs wird für die VEdV 2023 aus vorläufigen internen Abschätzungen von Intraplan übernommen. Daraus ergibt sich als Differenz eine Verkehrsleistung von 2.4 Mrd. Pkm für die Nichtbundeseigenen Eisenbahnen.
- ▶ Die Personenverkehrsleistung im Eisenbahnnahverkehr wird aus DESTATIS, Genesis online, Tabelle 46181-0005 abgeleitet. Die Verkehrsleistung der sonstigen Eisenbahnen ist die Differenz zwischen der Gesamtverkehrsleistung und der Verkehrsleistung der DB AG. Da zum 29.02.2024 in Genesis online erst die Verkehrsleistungen der Quartale 1-3 des Jahres 2023

⁶ Emissionen aus der Erzeugung von Bahnstrom werden dagegen der Energiewirtschaft (1.A.1) zugerechnet.

vorlagen, wurde angenommen, dass die Verkehrsleistung des Gesamtjahres der Zunahme der Quartale 1-3 entspricht (+7,5 %).

- ▶ Die spezifischen Energieverbrauchswerte, die Emissionsfaktoren und Besetzungsgrade der sonstigen Bahnen werden, analog zum Inventar, wie bei der DB AG angesetzt. Die spezifischen Verbrauchswerte im Personennah- und Fernverkehr haben sich aufgrund der verbesserten Auslastung gegenüber 2023 verringert.
- ▶ Der Dieserverbrauch des nicht-öffentlichen Verkehrs wird aus dem Vorjahr übernommen.

Tabelle 59: Verkehrsleistungsentwicklung im Eisenbahnverkehr 2022-2023

		2022	2023	2022-2023
Personennahverkehr	Mrd. Pkm	50,9	54,7	+7,5%
davon DB	Mrd. Pkm	34,8	37,5	+7,9%
Personenfernverkehr	Mrd. Pkm	43,4	47,6	+9,8%
davon DB	Mrd. Pkm	41,5	45,2	+9,0%
Güterverkehr	Mrd. tkm	132,6	124,9	-5,8%
davon DB	Mrd. tkm	59,6	51,9	-12,9%

Quelle: DB AG, DESTATIS, ifeu-Annahmen; Gesamtverkehrsleistungen 2023 vorläufig

Damit wurden bei der Verkehrsleistung im Jahr 2023 etwa 68 % des Personennahverkehrs (PNV), 95 % des Personenfernverkehrs (PFV) und 42 % des Güterverkehrs (GV) der Eisenbahnen (ohne Werkverkehr) von der DB erbracht.

Die Hochrechnung mit den getroffenen Annahmen ergibt eine Abnahme des Dieserverbrauchs der Eisenbahn gegenüber 2022 um 5,5 %. Da die mit TREMOD berechnete Abnahme z.T. auf abgeschätzten Verkehrsleistungen beruht, wird für die VEdV angenommen, dass der Dieserverbrauch der Bahnen gegenüber 2022 gerundet um 5 % abnimmt.

3.5 Straßenverkehr

3.5.1 Vorgehen

Die THG-Emissionen des Straßenverkehrs (1.A.3.b) stützen sich in den nationalen Emissionsinventaren auf die in EBZ 62 – *Straßenverkehr* ausgewiesenen Energiemengen (Ottokraftstoffe, Diesekraftstoffe und Flüssiggas). In den VEdV werden die Energiemengen als Differenz zwischen dem Gesamtabsatz nach der Amtlichen Mineralölstatistik und dem Verbrauch aller übrigen Sektoren abgeleitet. Der Verbrauch für Erdgas und Biogas im Straßenverkehr wird aus vorläufigen Daten der AG Energiebilanzen ermittelt.

Für die VEdV wird eine differenzierte Berechnung mit TREMOD analog dem Vorgehen beim Inventar (siehe Kapitel 2.2) durchgeführt. Da verschiedene Daten zu diesem frühen Zeitpunkt noch nicht vorliegen, müssen verschiedene Daten mit Modellrechnungen oder Schätzungen ergänzt werden. Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die Datengrundlagen und das Vorgehen für die VEdV 2023.

3.5.2 Neuzulassungen und Bestand

Für die VEdV 2023 lag die Sonderauswertung der Neuzulassungen 2023 des KBA vor. Die Fahrzeugbestände zum 1.1. des aktuellen Jahres hingegen stehen zu diesem Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung. Die Bestände für das Jahr 2023 werden daher auf Basis der vorliegenden Neuzulassungszahlen und der Überlebenskurven des TREMOD-Trendszenarios berechnet.

Die folgende Tabelle 60 zeigt die Neuzulassungen des Jahres 2023.

Tabelle 60: Anzahl der Neuzulassungen im Jahr 2023

Fahrzeugkategorie	gesamt	davon: Benzin	davon: Diesel	davon: Gas	davon: BEV	davon: PHEV
Pkw	2.844.609	50,46%	24,42%	0,51%	18,43%	6,18%
LNF	251.294	6,94%	85,00%	0,05%	7,99%	0,01%
Lkw	39.399		93,95%	1,73%	4,32%	
Sattelzüge	42.426		97,95%	1,35%	0,70%	
Linienbusse	4.471		81,28%	0,83%	17,89%	
Reisebusse	1022		99,12%		0,88%	
Krafträder	222.046	92,37%			7,63%	
Kleinkrafträder	50.000	60,91%			39,09%	

Quellen: KBA-Sonderauswertung, Januar 2024; Kleinkrafträder: ifeu-Annahmen

Mit dem TREMOD-Bestandsumschichtungsmodell ergeben sich daraus die in Tabelle 61 dargestellten Fahrzeugbestände zur Jahresmitte 2022, welche den Daten des Vorjahres 2021 gegenübergestellt sind.

Tabelle 61: Berechnete Fahrzeugbestände 2023 im Vergleich zu 2022 jeweils als Jahresmittelwert nach Antriebsart

Fahrzeugkategorie	Jahr	Benzin	Diesel	Gas	BEV	PHEV	Gesamt
Pkw	2022	31.718.590	14.991.628	410.681	815.735	659.332	48.595.965
	2023	30.860.483	14.411.632	380.103	1.300.932	964.253	47.917.404
	Diff	-3%	-4%	-7%	59%	46%	-1%
LNF	2022	176.685	2.826.136	12.129	49.211	465	3.064.625
	2023	171.558	2.842.245	11.368	66.343	502	3.092.016
	Diff	-3%	1%	-6%	35%	8%	1%
SNF	2022		747.939	5.709	3.120		756.768
	2023		738.927	6.525	4.332		749.784
	Diff		-1%	14%	39%		-1%
Busse	2022		79.184	810	1.586		81.579
	2023		77.852	801	2.268		80.921

Fahrzeug-kategorie	Jahr	Benzin	Diesel	Gas	BEV	PHEV	Gesamt
	Diff		-2%	-1%	43%		-1%

Quelle: Daten 2023: Neuzulassungen nach KBA und ifeu-Annahmen, Daten 2022: KBA

3.5.3 Effizienzentwicklung

Die Entwicklung der Effizienz bzw. des spezifischen Kraftstoffverbrauchs wird ebenfalls vom KBA, im Rahmen des CO₂-Monitorings für Pkw und LNF, erfasst. Sie beruht auf den mittleren CO₂-Emissionen und Energieverbräuchen je Fahrzeugmodell im WLTP (bis 2018 im NEFZ). Diese Daten konnten vom KBA als Sonderauswertung für die Neuzulassungen im Jahr 2023 zur Verfügung gestellt werden (siehe Tabelle 62 und Tabelle 63).

Zusätzlich werden Aufschlagsfaktoren für die Entwicklung des Realverbrauchs gegenüber den Monitoring-Werten verwendet, welche in einem UBA-Projekt (Tietge et al. 2020) erarbeitet wurden. Für das Jahr 2023 wird angenommen, dass der Realverbrauchsaufschlag des Vorjahres 2022 verwendet werden kann. Die für die VEdV verwendete Entwicklung der CO₂-Emissionen der Neuzulassungen sind in Tabelle 62 und Tabelle 63 dargestellt.

Tabelle 62: Entwicklung der mittleren CO₂-Emissionen von Neufahrzeugen in g/km für Pkw im WLTP

Antrieb	2022	2023	Änderung 23/22
Benzin ¹	148	147	-1%
Diesel ¹	167	164	-2%
BEV	0,0	0,0	-
LPG	119	120	+1%
CNG	107	108	+1%
PHEV Benzin	35	35	-
PHEV Diesel	35	20	-43%
Alle Pkw	109	114	+4%

Quelle: KBA-Sonderauswertung 2024. Anmerkung: ¹Inkl. HEV.

Tabelle 63: Entwicklung der mittleren CO₂-Emissionen von Neufahrzeugen in g/km für LNF im WLTP

Antrieb	2022	2023	Änderung 23/22
Benzin ¹	176	189	+7%
Diesel ¹	211	216	+3%
BEV	0,0	0,0	
CNG	119	193	+62%
PHEV Benzin	61	95	+57%

Antrieb	2022	2023	Änderung 23/22
Alle LNF	192	197	+2%

Quelle: KBA-Sonderauswertung 2024. Anmerkung: ¹Inkl. HEV.

Für die schweren Nutzfahrzeuge existiert ein CO₂-Monitoring erst seit dem Jahr 2019. Die Daten dafür werden von der europäischen Umweltagentur (EEA) in Form einer online verfügbaren Datenbank mit Angaben zu einzelnen Nutzfahrzeugmodellen veröffentlicht. Da diese Daten des vorausgehenden Jahres nicht rechtzeitig für die VEdV vorliegen, können sie nicht berücksichtigt werden (Werte für das Jahr 2021 wurden im September 2022 veröffentlicht).

Für alle Fahrzeugschichten ohne verwendbare Realdaten zur Effizienzentwicklung werden die Annahmen des TREMOD-Trendszenarios übernommen, welches aufgrund der europäischen CO₂-Flottenzielwert-Gesetzgebung bereits gewisse Effizienzverbesserungen und weitere Annahmen beinhaltet. Bei den schweren Nutzfahrzeugen und Bussen wird eine Reduktion des spezifischen Kraftstoffverbrauchs um 0,5% pro Jahr pauschal für alle Segmente und Straßenkategorien angenommen.

Bei motorisierten Zweirädern bleibt der spezifische Kraftstoffverbrauch konstant.

3.5.4 Fahrleistungen

Güterverkehr

Die Basisquelle für die Berechnung der Fahrleistung des Güterverkehrs sind die Fahrleistungen auf Autobahnen und Bundesstraßen der Mautstatistik. Daten des Verkehrsbarometers liegen zwar vor, aber werden für den Schwerverkehr nicht verwendet, weil die Mautstatistik als die zuverlässigste Quelle erachtet wird (siehe unten). Die Ergebnisse der Mautstatistik 2022 und 2023 sind in Tabelle 64 dargestellt.

Tabelle 64: Fahrleistungen auf Autobahnen und Bundesstraßen 2022 und 2023 in der Mautstatistik

	2022	2023
Fahrleistungen auf Autobahn	33,8 Mrd. km	32,6 Mrd. km
Fahrleistungen auf Bundesstraßen	7,4 Mrd. km	7,0 Mrd. km
Summe	41,3 Mrd. km	39,7 Mrd. km

Quelle: (BALM 2023)

2023 wurden insgesamt 39,7 Milliarden Kilometer von mautpflichtigen Fahrzeugen zurückgelegt. Dies entspricht einem Rückgang von 3,9 % ggü. 2022.

Zur Plausibilisierung können die Fahrleistungsänderung der Mautstatistik mit den Daten vom Verkehrsbarometer verglichen werden. Der Vergleich zeigt eine relative gute Übereinstimmung auf Autobahn aber klare Unterschiede auf Bundesstraßen, die beim nächsten Inventar detaillierter untersucht werden (siehe Tabelle 65). Insgesamt zeigt der Güterverkehr in beiden Datenquellen einen Rückgang.

Tabelle 65: Wachstumsrate der Fahrleistung bzw. der DTV auf Autobahnen und Bundesstraßen laut Mautstatistik und Verkehrsbarometer 2022-2023

FzKat	Verkehrsbarometer		Mautstatistik*	
	Autobahn	Bundesstraße	Autobahn	Bundesstraße
LNF	1,0%	0,2%		
Lkw	-3,1%	-6,6%		
LZ	-2,8%	-8,8%		
SZ	-4,7%	-7,5%		
Mautverkehr			-3,6%	-5,1%

Quellen: (BASt 2023), (BALM 2023a), eigene Berechnungen

Die Unterschiede lassen sich durch zwei wesentliche Gründe erklären:

- ▶ Die Fahrleistungen gemäß Verkehrsbarometer basieren auf Rohdaten der DTV der automatischen Verkehrszählungen der BASt für 2023, die auf den durchschnittlichen Kfz-Verkehr 2022 normiert sind. Daher wurden die monatlichen Änderungsfaktoren der Verkehrsmengen von ifeu in DTV-Werte umgerechnet, um daraus die jährlichen Änderungsfaktoren aggregiert oder disaggregiert in Prozent berechnen zu können. Sie sind also nur Orientierungswerte für die Veränderungen, aber noch keine verlässlichen Werte für die absoluten Fahrleistungen.
- ▶ Die Fahrleistung der mautpflichtigen Fahrzeuge sind automatisch durch eine Kombination der Mobilfunktechnologie (GSM) mit dem Satellitenortungssystem GPS basierend auf einer sogenannten *On-Board Unit* (OBU) vom BAG erfasst. Die öffentlichen verfügbaren abgeleiteten Fahrleistungen sind dementsprechend präzise und gelten hier als Referenz. Allerdings deckt die Mautstatistik die Lkw zwischen 3,5t und 7,5t zGG. nicht ab.

Deshalb werden für die VEdV 2023 die Änderungen der Fahrleistung des Schwergüterverkehrs auf Autobahn und Bundesstraße 2023 vs. 2022 der Mautstatistik übernommen, mit der Annahme, dass die Änderung für die Gruppe 3,5 bis 7,5t zGG auch anwendbar ist.

Da keine Quelle für die Fahrleistungen auf den übrigen Straßen vorliegt, werden die relativen Änderungen der Fahrleistung des Güterverkehrs auf den restlichen Straßenkategorien mit den Fahrleistungsänderungen auf den Bundesstraßen gleichgesetzt. Insgesamt ergibt sich so ein Rückgang der Fahrleistung schwerer Nutzfahrzeuge (Lkw, LZ, Sz) in der VEdV 2023 in Höhe von -4,3 % ggü. 2023 (siehe Tabelle 67). Die Fahrleistung der UeKfzs folgt der Änderungsrate der Lkw. Ihr Anteil an die Lkw Fahrleistung bleibt bei ca. 8,4% stabil.

Die Mittelfristprognose Sommer 2023 (Intraplan 2023), erstellt von Intraplan im Auftrag des Bundesamts für Logistik und Mobilität (BALM), verzeichnet auch einen klaren Rückgang der Verkehrsleistungen mit -4,2% ggü. 2022 (Intraplan 2022). Damit ist der Rückgang der Fahrleistungen und Verkehrsleistungen identisch.

Für die Fortschreibung der leichten Nutzfahrzeuge wird das Verkehrsbarometer verwendet mit einem Anstieg von 1% der Fahrleistungen auf Autobahn und 0,2% auf Bundesstraßen (siehe Tabelle 76). Dabei werden, wie beim MIV (siehe folgenden Abschnitt), die Änderungen der Bundesstraßen 2023 gegenüber 2022 auch für die sonstigen Straßen übernommen. Der Anstieg der Fahrleistung der LNF in TREMOD liegt damit bei +0,4 % (siehe Tabelle 67).

Motorisierter Individualverkehr

Grundlage für die Ableitung der Fahrleistungsentwicklung des MIV ist das Verkehrsbarometer. Die Änderungsraten der Verkehrsmengen (DTV) je Fahrzeugkategorie für den MIV sind in Tabelle 66 zusammengefasst.

Tabelle 66: Jährliche Änderungsrate 2022-2023 im Verkehrsbarometer

FzKat	Autobahn	Bundesstraße
KR	-5,4%	-11%
Pkw	+3,4%	+0,8%

Quelle: (BASt 2024), eigene Berechnungen

Im Jahr 2023 war bei den Pkw ein deutlicher Anstieg der Fahrleistung auf Autobahnen ggü. 2022 zu beobachten, während der Anstieg auf Bundesstraßen sich deutlich geringer erweist. Die gewichtete jährliche Änderungsrate ist damit für die beiden Straßenkategorien +3%.

Im Vergleich prognostiziert Intraplan in der Mittelfristprognose Sommer 2023 (Intraplan 2023) eine ähnliche Veränderung 2022-2023 von +2,8% der MIV-Verkehrsleistungen.

Der Rückgang der DTV der Kräder des Verkehrsbarometers in 2023 ggü. 2022 erscheint dagegen zu hoch zu sein. Da keine andere Quelle diese Entwicklung für 2023 abbildet, wurden die Änderungsrate von Pkw für den individualen motorisierten Verkehr gesamt verwendet, inkl. für Zweiräder.

Ähnlich zu dem Güterverkehr kann keine zuverlässige Quelle für die restlichen Straßenkategorien herangezogen werden. Die Änderungsrate der Fahrleistung auf diesen Straßen wird der Änderungsrate auf Bundesstraßen je Fahrzeugkategorie nach dem Verkehrsbarometer gleichgesetzt. Aktuelle Analysen zur Verwendung der automatischen Straßenverkehrszählungen der Bundesländer zeigen Potentiale aber erfordern mehr Untersuchungen, um für die Ableitung der Fahrleistung benutzt werden zu können, wie im Bericht „Verbesserung der Vorjahresschätzung der Klimagasemissionen des Verkehrssektors“ (Allekotte et al. 2023), Annex A im Detail erläutert.

Die Pkw Fahrleistungen, die ca. 97% der MIV-Fahrleistungen ausmachen, sind im VEdV 2023 mit 572,1 Milliarden Kilometer noch unter dem vor-Corona Niveau von 2019, und weisen ein Wachstum von 1,6% ggü 2022 auf. Die Krafträder (KR) Fahrleistung nimmt um 1,1% zu, während das Wachstum der Kleinkrafträder (KKR) leicht geringer ist: 0,8% ggü.2022. Damit sind die TREMOD VEdV 2023 für MIV +1,6% über dem Fahrleistungsniveau 2022 und leicht niedriger als die Sommer Prognose (Intraplan 2023). Die übrigen Fahrzeuge „Uekfzl“ sind aus der Pkw Kategorie abgeleitet. Sie haben einen Anteil von ca. 0,3% auf Autobahn und 0,1% auf den anderen Straßenkategorien. Die Quelle ist (Bäumer et al. 2016), es wird nach 2014 angenommen, dass dieser Anteil konstant bleibt.

Die detaillierten Ergebnisse der Fahrleistung MIV sind in Tabelle 67 dargestellt.

Busverkehr

Die Fahrleistungen der Linien- und Fernlinienbusse wurden für 2022 aus Destatis (Destatis 2023a) übernommen, und entsprechend weichen sie von den im Inventar für TREMOD 5.51 angenommenen Werten ab. Leider erscheint die jährliche Destatis Publikation der Fahrleistungen für das aktuelle Jahr 2023 erst zum Jahresende 2024 und können daher nicht berücksichtigt werden. Dementsprechend sind die Werte für Busse 2023 wie folgt geschätzt worden:

- ▶ Für *Linienbusse (LBus)* wurde angenommen, dass die Fahrleistung stabil ggü. 2022 bleiben, da erst eine minimale Änderung von 4% der Verkehrsleistungen aus der Quartalstatistik von Destatis ausgelesen wurden. Damit werden die Fahrleistungen 2019 übertroffen und der Fahrbetrieb des Linienbusverkehrs normalisiert sich.
- ▶ Für *Fernlinienbusse (FLBus)* liegt die Quartalstatistik „Busse und Bahnen“ von Destatis für die ersten drei Quartale 2023 vor. In diesem Zeitraum sind die Verkehrsleistungen der Fernlinienbusse um 58% ggü. dem gleichen Zeitraum 2022 gestiegen. Da die Quartalsstatistiken noch keine exakten Daten für das Gesamtjahr liefern, wurde angenommen, dass die Änderungsrate der Fahrleistung 50% beträgt. Das Niveau der Fahrleistung der Fernlinienbusse 2023 bleibt trotzdem immer noch ca. 40% unter dem Niveau der Fahrleistungen 2019 dieser Buskategorie.
- ▶ Für *Reisebusse (RBus)* gibt es keine verfügbare Statistik. Es wurde die Fahrleistung 2023 zur Hälfte der Änderungsrate der Fernlinienbusse geschätzt, d.h. +25%. Damit wären die Fahrleistungen nur noch 35% unter dem Niveau 2019.

Insgesamt steigen die Busfahrleistungen im VEdV 2023 mit 7% ggü. 2022 weiterhin an.

Spezifische Fahrleistungen nach Fahrzeugsegment und Antrieb

Im Kontext der VEdV ist auch die Aufteilung der Fahrleistung der Pkw auf Benzin- und Dieselfahrzeuge eine sensible Größe. Benzinverbrauch und Fahrleistung der Benzin-Pkw lassen sich gut anhand der Absatzzahlen und dem spezifischen Verbrauch ermitteln und plausibilisieren.

Anders bei den Diesel-Pkw: Der Dieserverbrauch teilt sich auf Pkw, LNF, SNF und Busse auf. Daher gibt es keine direkte Korrelation zwischen dem Verbrauch der Diesel-Pkw und dem Gesamtverbrauch an Diesel. Am Ende müssen die Fahrleistungen der Benzin- und Diesel-Pkw mit der Gesamtfahrleistung der Pkw übereinstimmen. Hierbei ist die Entwicklung der spezifischen Fahrleistung je Fahrzeug eine wichtige Erklärungsgröße.

Hinweise für veränderte Fahrleistungen der Pkw nach Antrieb liefert (KBA 2020) das „Tankbuch“ des MOP (Ecke et al. 2023). Aus der Quelle lässt sich ein Rückgang der mittleren Fahrleistung der Diesel-Pkw erkennen, damit wurde 2023 das Verhältnis der Fahrleistung je Fahrzeug für Diesel Pkw gegenüber Benzin-Pkw auf 1,7 statt 1,8 im Jahr 2022 verringert.

Zusammenfassung Fahrleistungen

Wie in Tabelle 67 zu entnehmen sind die Fahrleistungen 2023 knapp 1% höher als die Fahrleistungen 2022. Der Fahrleistungsrückgang durch die Corona-Pandemie seit 2019 (Gesamtfahrleistung 2019: 784.380 Mrd.km) ist somit auch 2023 noch sichtbar.

Vor allem die Fahrleistungen der Pkw sind etwas gestiegen, und liegen 1,6% höher als 2022. Die leichten Nutzfahrzeuge haben eine um 0,4 % höhere Fahrleistung als 2022. Der Busverkehr ist 2023 angestiegen (+7,2%). Der Güterschwerverkehr ging aber deutlich zurück (-4,3%).

Tabelle 67: Ergebnisse der Fahrleistungen je Fahrzeugkategorie für die Jahre 2022-2023

	2022 (Mio. km)	2023 (Mio. km)	Änderung 2023/2022
KKR	4.856	4.895	+0,8%
KR	9.636	9.742	+1,1%
Pkw	563.149	572.052	+1,6%

	2022 (Mio. km)	2023 (Mio. km)	Änderung 2023/2022
UeKfzl	890	911	+2,1%
Bus	3.737	4.007	+7,2%
<i>dav. SRBus</i>	984	1.230	+25,0%
<i>dav. FLBus</i>	48	72	+50,0%
<i>dav. LBus</i>	2.704	2.704	0,0%
LNF	56.132	56.365	+0,4%
Lkw+Lz+Sz	63.202	60.466	-4,3%
<i>dav. Lkw</i>	18.334	7.638	-3,8%
<i>dav. LZ</i>	10.404	9.943	-4,4%
<i>dav. SZ</i>	34.464	32.885	-4,6%
UeKfzs	1.542	1.489	-3,4%
Summe	703.146	709.927	+1,0%

Quelle: ifeu-Berechnungen

Unsicherheit bzgl. der Fahrleistungen 2023 besteht aus den folgenden Gründen:

- ▶ Die Unsicherheit bzgl. der Statistik: für den Schwerverkehr wird die Fahrleistung der Lkw<7,5t anhand von (Bäumer et al. 2016) und (Mahmoudi und Frenken 2020) geschätzt. Darüber hinaus wird das Verkehrsbarometer aktuell immer noch rückwirkend von der BAST aktualisiert, so dass sich die aktuell verwendeten Änderungsraten der Fahrleistungsentwicklung in Zukunft noch ändern werden. Diese Unsicherheiten betreffen die Fahrleistungen auf Autobahn und Bundesstraße, die 46 % der gesamten Fahrleistungen ausmachen.
- ▶ Die Unsicherheit bzgl. der Fahrleistungen auf den übrigen Straßen aufgrund der nicht vorliegenden Fahrleistungseckwerte für die einzelnen Fahrzeugkategorien. Dies betrifft 54 % der Fahrleistungen, d.h. die Fahrleistungen auf die restlichen Straßenkategorien. Sie ist damit derzeit eine wichtige Variable bei der iterativen Plausibilisierung der Ergebnisse. Zukünftig sollte jedoch angestrebt werden, die Datenlage zur Fahrleistung auf dem nachgeordneten Netz zu verbessern. Dafür besteht ein Bedarf an umfangreicheren Statistiken in der nahen Zukunft.

3.6 Ergebnisse der VEdV 2023

3.6.1 Energieverbrauch und THG-Emissionen nach Kategorien

Die Inlandsablieferungen der Amtlichen Mineralölstatistik (AMS)⁷ für das Jahr 2023 und die Aufteilung auf die Kategorien (Stand 29.02.2024) sind in der nachfolgenden Tabelle 68 dargestellt⁸. Bei mehreren Kategorien wurden die Gesamtmengen auf Basis der nationalen Emissionsinventare für das Jahr 2022 mit Annahmen zur Entwicklung bis 2023 fortgeschrieben (siehe Details in

⁷ intern zur Verfügung gestellt am 29.02.2024

⁸ Die Werte der AMS wurden hier bereits von massebezogenen Einheiten (Tonnen) in physikalische Einheiten (PJ) umgerechnet. Die Umrechnungsfaktoren und detaillierten Mengen sind in Anhang C.1 dargestellt.

Kapitel 3.1 bis 3.5). Biokraftstoffe werden anteilig proportional zu den mineralischen Kraftstoffen auf die Kategorien verteilt, wobei alle Kategorien der Schifffahrt und Marine keine Biokraftstoffe verwenden. Beim Flugverkehr werden die Kraftstoffmengen, die auf den nationalen Verkehr entfallen, mit TREMOD-AV berechnet (siehe Kapitel 3.2). Die Differenz aus Absatz und Verbrauch national wird dem internationalen Verkehr zugeordnet.

Tabelle 68: Energieverbrauch 2023 in PJ gemäß AMS und Aufteilung auf einzelne Quellkategorien

	Diesel total	Diesel fossil	Diesel bio	HEL	Ben-zin total	Ben-zin fossil	Ben-zin bio	Kero-sin	Flug-ben-zin
Inlandsablieferungen gemäß AMS Dez 2023	1.418	1.321	97		739	706	33	405	0,13
1.A.2.g vii – BauWi	25	24	1,8		5,4	5,2	0,2		
1.A.3.c – Schienenverkehr	11	10	0,7						
1.A.3.d – Binnenschifffahrt	9,3	9,3	0						
1.A.3.d – Seeschifffahrt				7,9					
1.A.4.a ii – GHD	5,6	5,2	0,4						
1.A.4.b ii – Haushalte					3,4	3,2	0,2		
1.A.4.c ii (i) – LaWi	76	71	5,3						
1.A.4.c ii (ii) – FoWi	2,7	2,5	0,2		3,7	3,6	0,2		
1.A.4.c iii – Fischerei				0,22					
1.A.5.b i – Militär: Land	0,3	0,3	0,0		2,1	2,0	0,1		
1.A.5.b ii – Militär: Luft								3,9	0,00
1.A.5.b iii – Militär: Marine				0,13					
ZWISCHENSUMME	130	122	8,4	8,2	15	14	0,7	3,9	0,00
Summe 1.A.3.a und 1.D.1.a– zivile Luftfahrt								400,8	0,13
davon: 1.A.3.a national								15,1	0,12
davon: 1.D.1.a international								385,7	0,01
1.A.3.b – Straßenverkehr	1.288	1.199	89		724	691	33		

Quelle: AMS, Dezember 2023 und eigene Annahmen

Neben den Kraftstoffen der AMS werden im Verkehr weitere Energieträger genutzt, die in der THG-Bilanz des Verkehrs zu berücksichtigen sind. Es handelt sich hierbei um Erdgas, Biomethan und LPG. Die Mengen für 2023 werden aus vorläufigen und noch internen Angaben der AG Energiebilanzen entnommen. Die zugrundeliegenden Mengen für den Straßenverkehr sind in Tabelle 70 im nächsten Kapitel dargestellt.

Die Treibhausgasemissionen im Jahr 2023 im Verkehr werden schließlich mit den energieträgerspezifischen CO₂-Emissionsfaktoren und den fahrzeugspezifischen CO_{2eq}-Emissionen von CH₄ und N₂O (aus TREMOD 6.52) berechnet. In der Gesamtbilanz des Verkehrs werden außerdem die CO₂-Emissionen aus in Zweitakttern mitverbrannten Kraftstoffen (2023: 0,0053 Mio. t) und die THG-Emissionen aus Festbrennstoffen im Schienenverkehr (2023: 0,031 Mio. t, Übernahme aus 2022) eingerechnet. Die nachfolgende Tabelle 69 zeigt die Ergebnisse für den Sektor „Verkehr“.

Tabelle 69: Treibhausgasemissionen des Verkehrs 2023 in MT CO_{2eq}

	Diesel	Benzin	Gase (LPG, NG)	Kerosin	Flugbenzin	Summe 2023*	Summe 2022*
1.A.3.a - ziv. Inlandsflugverkehr				1,11	0,01	1,13	1,04
1.A.3.b – Straßenverkehr	90,4	50,7	1,1			142,3	144,0
1.A.3.c – Schienenverkehr	0,74					0,77	0,81
1.A.3.d – nationale Schifffahrt	0,69	0,02	0,00			1,36	1,40
Summe	91,9	50,7	1,1	1,1	0,01	145,5	147,3

Anmerkungen: *inkl. sonstige Brennstoffe (Schmierstoffe Straße, Festbrennstoffe Schiene, HEL und HS Seeschifffahrt)

Quelle:

3.6.2 Energieverbrauch und THG-Emissionen im Straßenverkehr

Der Straßenverkehr ist mit rund 98% verantwortlich für den weitaus größten Teil der Emissionen des Verkehrs. Daher werden der Energieverbrauch und die THG-Emissionen des Straßenverkehrs mit TREMOD weiter differenziert nach Fahrzeugkategorien. Die zugrunde liegenden Basisdaten und Annahmen sind in Kapitel 3.5 dargestellt.

Diese Ergebnisse sind Daten- und Annahmen-gestützte Modellierungsergebnisse. Die Unsicherheiten der Eingangsdaten wirken sich dabei auf die Aufteilung der Energiemengen auf verschiedene Verbraucher des Straßenverkehrs aus. Da der Energieverbrauch des Straßenverkehrs aber als Restmenge der abgesetzten Kraftstoffe berechnet wird, haben diese Modellierungsergebnisse nahezu keine Auswirkungen auf die berechneten Gesamtemissionen des Straßenverkehrs.

Tabelle 70 zeigt die Entwicklung des Energieverbrauchs im Straßenverkehr von 2022 bis 2023 nach Energieträgern gemäß den Ergebnissen aus TREMOD 6.52. Gegenüber 2022 hat der Energieverbrauch für Benzin, Erdgas und Strom sowie die Biokraftstoffe zugenommen. Dagegen hat der Verbrauch an Dieselmotorkraftstoff abgenommen. Insgesamt ergibt sich daraus ein Rückgang des Energieverbrauchs von 0,5 %.

Tabelle 70: Endenergieverbrauch im Straßenverkehr nach Energieträgern

	2022	2023	2022-2023
	PJ	PJ	Änderung
Benzin	670,3	691,4	+3,1%
Bioethanol	31,1	32,6	+4,8%
Diesel	1.245,6	1.199,0	-3,7%
Biodiesel	86,6	89,1	+2,9%

	2022	2023	2022-2023
Erdgas	3,1	6,9	+121,7%
Biogas	3,8	4,5	+19,0%
LPG	11,8	11,1	-5,7%
Strom	11,1	18,7	+68,9%
Gesamt	2.063	2.053	-0,5%

Anmerkungen: Bilanzgrenze: Inlandsabsätze von Kraftstoffen, außer Strom: TREMOD-Ergebnisse

Quelle: AMS, ifeu-Berechnungen mit TREMOD.

Tabelle 71 stellt den Endenergieverbrauch im Straßenverkehr in den Jahren von 2022 bis 2023 in der Differenzierung nach Fahrzeugkategorien dar. Der größte Rückgang fand im Straßengüterverkehr statt.

Tabelle 71: Endenergieverbrauch im Straßenverkehrs nach Fahrzeugarten

	2022	2023	2022-2023
	PJ	PJ	Änderung
Bus	39	41	+5,6%
LNF	184	183	-0,7%
MZR	19	19	+0,9%
Pkw	1.282	1.293	+0,9%
SNF	528	505	-4,3%
sonstige	12	12	-2,3%
Summe	2.063	2.053	-0,5%

Anmerkungen: Bilanzgrenze: Inlandsabsätze von Kraftstoffen, außer LNG und Strom: TREMOD-Ergebnisse

Quelle: AMS, ifeu-Berechnungen mit TREMOD.

Tabelle 72 zeigt schließlich die resultierenden Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs von 2022 bis 2023. Diese nahmen insgesamt um 1,2 % ab und damit stärker als der Energieverbrauch. Entscheidend für diese Entwicklung war der zunehmende Anteil an Biokraftstoffen und Strom bei allen Fahrzeugkategorien.

Tabelle 72: THG-Emissionen des Straßenverkehrs nach Fahrzeugarten

	2022	2023	2022-2023
	Mio. t	Mio. t	Änderung
Bus	2,7	2,8	+4,6%
LNF	12,8	12,7	-1,2%
MZR	1,4	1,4	+0,6%
Pkw	89,2	89,3	+0,1%
SNF	37,0	35,2	-5,0%

	2022	2023	2022-2023
sonstige	0,9	0,8	-2,8%
Summe	144,0	142,3	-1,2%

Anmerkungen: Bilanzgrenze: Inlandsabsätze von Kraftstoffen, außer LNG; TREMOD-Ergebnisse
 Quelle: AMS, ifeu-Berechnungen mit TREMOD

Die dargestellten Ergebnisse für den Straßenverkehr sind abgestimmt auf die Kraftstoffabsätze gemäß der AMS. Dabei ergeben sich in jedem Jahr Differenzen zu den mit TREMOD berechneten Ergebnissen, die auf den Fahrleistungen im Inland beruhen (siehe Kapitel 3.5.4). In den letzten Jahren lag der so berechnete Energieverbrauch stets über dem Absatz (siehe Kapitel 2.6.3).

Die aktuellen Ergebnisse für das Jahr 2023 zeigen eine leichte Reduktion der Differenz zwischen Absatz und Verbrauch bei Benzin und Diesel. Die Ergebnisse basierend auf den Inlandsfahrleistungen gehen demnach mit -13 % etwas stärker zurück als der absatz-basierte Verbrauch. Allerdings ist das gegenüber der Entwicklung in früheren Jahren ein relativ geringer Unterschied.

Die nachfolgende Tabelle 73 zeigt die Ergebnisse für den Energieverbrauch von 2022 bis 2023 auf Basis der Inlandsfahrleistungen nach Energieträgern und die jeweilige Differenz zwischen dem Absatz gemäß Tabelle 70 und dem in TREMOD ermittelten Inlandsverbrauch.

Tabelle 73: Inlandsfahrleistung-basierter Energieverbrauch im Straßenverkehr nach Energieträgern

	2022	2023	2022-2023	2022	2023
	PJ	PJ	Änderung	Absatz ggü. Inland	Absatz ggü. Inland
Benzin	728,2	747,1	+2,6%	-8,0%	-7,5%
Bioethanol	33,8	35,2	+4,2%	-8,0%	-7,5%
Diesel	1.424,2	1.363,2	+4,3%	-12,5%	-12,0%
Biodiesel	99,0	101,3	+2,3%	-12,5%	-12,0%
Erdgas	5,0	6,9	+37,8%	-37,3%	+0,9%
Biogas	6,1	4,5	-26,0%	-37,3%	+0,9%
LPG	12,1	11,8	-2,6%	-2,7%	-5,8%
Strom	11,1	18,7	+68,9%		
Gesamt	2.319	2.289	-1,3%		

Quelle: Verkehrsbarometer, Mautstatistik, ifeu-Berechnungen mit TREMOD

Tabelle 74 zeigt schließlich die Ergebnisse für den Energieverbrauch auf Basis der Fahrleistungen im Inland und die jeweilige Differenz Absatz gemäß Tabelle 71 ggü. dem Inlandsverbrauch.

Tabelle 74: Inlandsfahrleistungs-basierter Energieverbrauch im Straßenverkehr nach Fahrzeugarten

	2022	2023	2022-2023	2022	2023
	PJ	PJ	Änderung	Absatz ggü. Inland	Absatz ggü. Inland
Bus	48	50	+4,4%	-18,0%	-17,1%

	2022	2023	2022-2023	2022	2023
LNF	200	197	-1,3%	-8,0%	-7,4%
MZR	21	21	+0,3%	-7,9%	-7,4%
Pkw	1.392	1.396	+0,3%	-7,9%	-7,3%
SNF	645	611	-5,3%	-18,2%	-17,4%
sonstige	14	14	-2,9%	-15,4%	-14,9%
Summe	2.319	2.289	-1,3%		

Quelle: ifeu-Berechnungen mit TREMOD

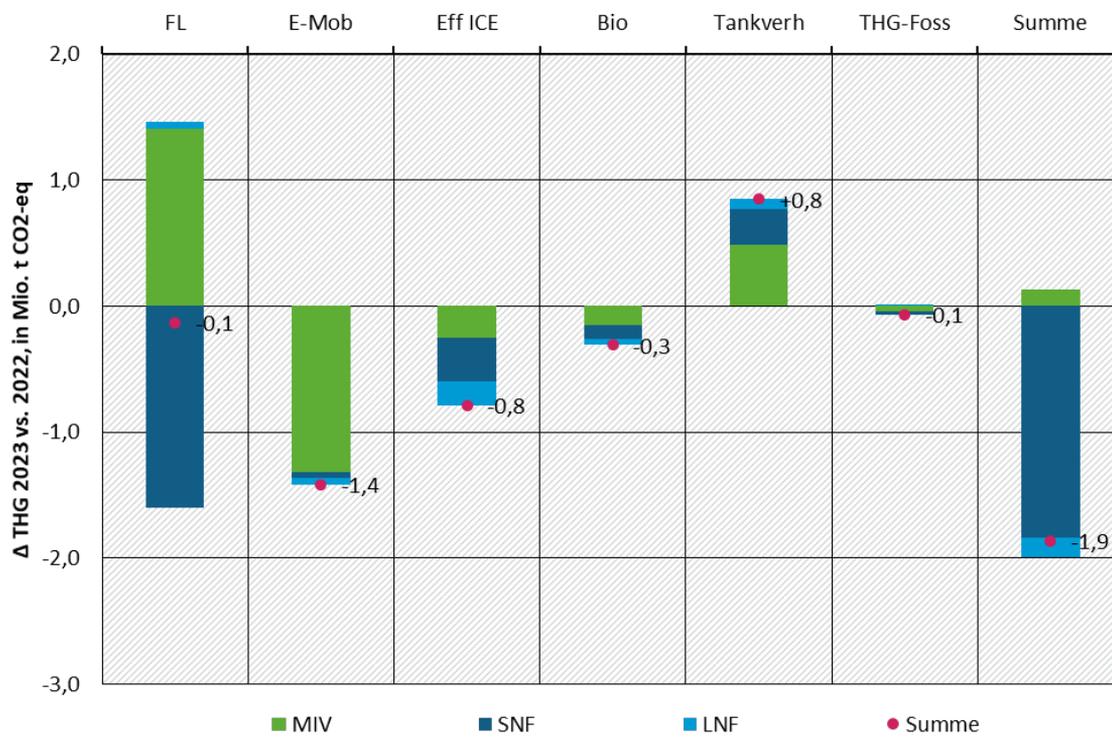
3.7 Ursachenanalyse

Die folgende Ursachenanalyse soll dazu dienen, die Ergebnisse der VEdV zu interpretieren und zu plausibilisieren. Die Methode wurde im Projekt „Verbesserung der Vorjahresschätzung der Klimagasemissionen des Verkehrssektors“ (Allekotte et al. 2023) entwickelt und hier übernommen. Abbildung 18 und Abbildung 19 stellen die Ergebnisse der Dekompositionsanalyse für die THG-Emissionen im Straßenverkehr im Jahr 2023 gegenüber dem Jahr 2022 und dem Jahr 2019 als Balkendiagramme dar.

Die Emissionen des MIV sowie der LNF und SNF sind in 2023 gegenüber dem Jahr 2022 um ca. 1,9 Mt CO_{2eq} gesunken. Als Ursachen wurden verschiedene mindernde (-) und -erhöhende (+) Effekte untersucht, welche sich zum Teil kompensieren. Die Reduktion der Fahrleistungen im Straßengüterverkehr glich in etwa die Zunahme der Fahrleistung im Personenverkehr aus. Zu einer THG-Minderung führte die starke Zunahme an Elektrofahrzeugen (-1,4 Mt), insbesondere bei den Pkw, gefolgt von Reduktionen beim spezifischen Kraftstoffverbrauch bei Verbrennerfahrzeugen (ca. -0,8 Mt), gefolgt von einem Anstieg des Anteils von Biokraftstoffen (-0,3 Mt). Das Verhältnis von inländischem Absatz zum inländischen Kraftstoffverbrauch stieg und führte hingegen zu einer Zunahme der Emissionen im Inland (+0,8 Mt).

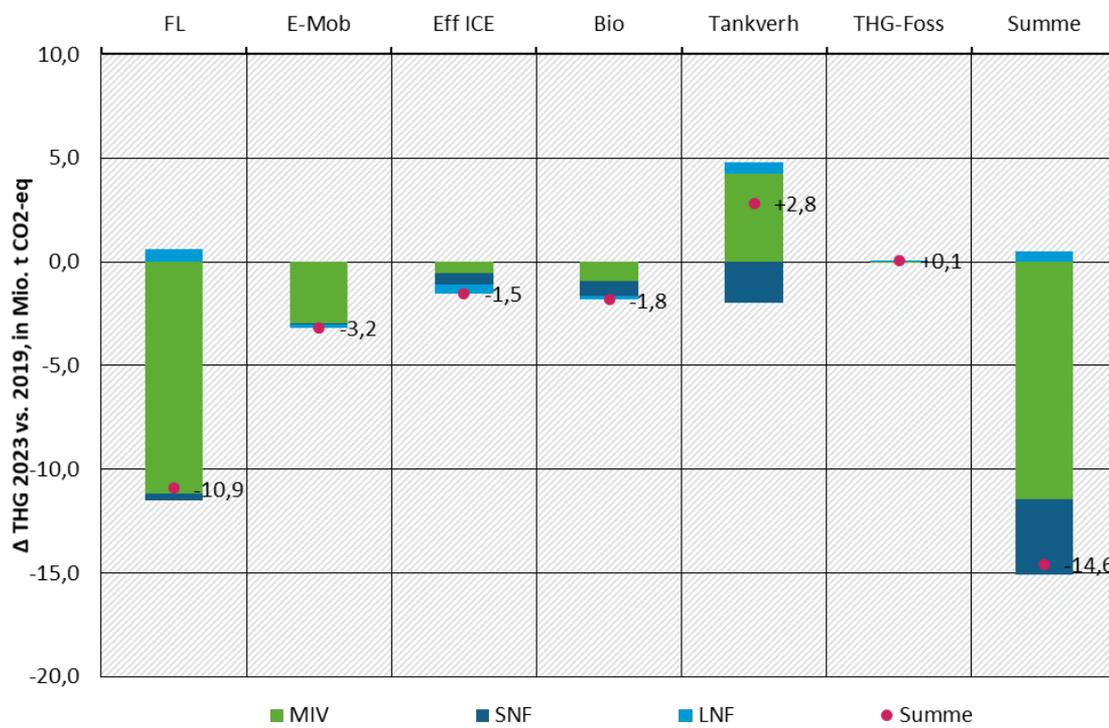
Gegenüber dem Jahr 2019, vor der COVID-19-Krise, waren die Emissionen des Straßenverkehrs im Jahr 2023 um fast 15 Mt CO_{2eq} geringer. Haupttreiber ist die deutlich reduzierte Fahrleistung im motorisierten Individualverkehr.

Abbildung 18: Ergebnisse Dekomposition MIV, LNF, SNF 2023/2022



Quelle: ifeu-Graphik. Erläuterung: FL: Fahrleistung, E-Mob: Elektromobilität, Eff ICE: Effizienz Verbrennerfahrzeuge, Bio: Biokraftstoffanteil, Tankverh: Tankverhalten bzw. Differenz Verbrauch/Absatz, THG-Foss: THG-Intensität fossile Kraftstoffe. Anmerkung: Positive Werte stellen eine THG-Erhöhung und negative Werte eine THG-Reduktion gegenüber Vorjahren dar. In Summe können sich die Effekte Einzelner Komponenten oder Fahrzeugkategorien kompensieren.

Abbildung 19: Ergebnisse Dekomposition MIV, LNF, SNF 2023/2019



Quelle: ifeu-Graphik. Erläuterung: FL: Fahrleistung, E-Mob: Elektromobilität, Eff ICE: Effizienz Verbrennerfahrzeuge, Bio: Biokraftstoffanteil, Tankverh: Tankverhalten bzw. Differenz Verbrauch/Absatz, THG-Foss: THG-Intensität fossile Kraftstoffe
 Anmerkung: Positive Werte stellen eine THG-Erhöhung und negative Werte eine THG-Reduktion gegenüber Vorjahren dar. In Summe können sich die Effekte Einzelner Komponenten oder Fahrzeugkategorien kompensieren.

4 Aktualisierung des Trendszenarios bis 2050

4.1 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.

Das Szenario berücksichtigt unter anderem die folgenden Maßnahmen:

- ▶ CO₂-Grenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bis 2030 (EU 2019a) bzw. die Änderungsverordnung für die CO₂-Grenzwerte bis 2035 und danach (EU 2023a)
- ▶ CO₂-Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge bis 2030 (EU 2019b)
- ▶ Die revidierte Eurovignetten-Richtlinie zur Ausgestaltung der Lkw-Maut (EU 2022a)
- ▶ Erneuerbare-Energien-Richtlinie bis 2030 (EU 2018) und das Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote (Bundesanzeiger 2021)

Die aufgezählten und weitere Instrumente sind auch im Projektionsbericht 2024 (Mendelevitch et al. 2024) der Bundesregierung berücksichtigt, auf welchen in den folgenden Abschnitten sofern relevant Bezug genommen wird. Zusätzlich gegenüber dem Projektionsbericht 2024 wurden die aufgrund von Haushaltskürzungen der Bundesregierungen gestoppten Förderprogramme für die Anschaffung von Elektrofahrzeugen berücksichtigt (Krenzer 2024).

Die Entwicklung der Verkehrs-, Betriebs- und Fahrleistungen wird, wie schon in der Vorversion (Allekotte et al. 2024), aus der „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2022“ des BMDV (BMDV 2023) abgeleitet, da neuere Prognosen bisher nicht vorliegen. Die Prognose deckt mit dem Endjahr 2051 den Zeitraum des Trendszenarios bis 2050 ab. Die Verkehrsleistungsentwicklung ab 2036 wird wie bisher übernommen. Zwischen 2023 und 2036 wird die Entwicklung neu interpoliert. Zur Umlegung der Verkehrsleistungen auf die Fahr- und Betriebsleistungen der verschiedenen Fahrzeugkategorien sind weitergehende Annahmen notwendig.

Für die Emissionsberechnung sind schließlich Annahmen zur Entwicklung des Fahrzeugbestands, der Fahr- und Verkehrsleistungen, der Energieeffizienz und des Emissionsverhaltens neuer Fahrzeugkonzepte sowie der zukünftige Anteil der Biokraftstoffe und anderer Energieträger festzulegen. Diese Annahmen wurden an aktuelle Erkenntnisse angepasst.

Die getroffenen Annahmen sind in den folgenden Kapiteln dargestellt

Sozioökonomische Annahmen

Die Annahmen zur demografischen und wirtschaftlichen Entwicklung sind in der „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2022“ vorgegeben. Die Bevölkerung nimmt bis 2041 gegenüber 2019 etwas zu und danach wieder leicht ab. Hierbei sinkt der Anteil der erwerbsfähigen Bevölkerung. Regional ist die Entwicklung sehr unterschiedlich, z.B. Rückgang in den ländlichen Regionen der östlichen Bundesländer, Zunahme im Süden und in Ballungsräumen. Das Bruttoinlandsprodukt steigt weiter deutlich an mit 1,35 % p. a. bis 2040 und danach mit 1,26 % p. a.. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Annahmen dargestellt.

Tabelle 75: Sozio-ökonomische Randbedingungen für das TREMOD- Trendszenario

Parameter	Aktuelle Annahmen im TREMOD-Trendszenario
Demografische Entwicklung	2019: 83,1 Mio. Einwohner 2041: 83,9 Mio. Einwohner 2051: 83,4 Mio. Einwohner
Wirtschaftsentwicklung (BIP)	2019-2040: +1,35% p.a. real 2040-2050: +1,26% p.a. real

Quelle: Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2022.

4.2 Entwicklung der Verkehrsleistungen

Die „Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2022“ geht vom Jahr 2019 aus und prognostiziert Verkehrsleistungen von 2036 bis 2051 in Fünfjahresschritten. Sie macht somit keine Aussagen über die Entwicklung zwischen 2020 und 2035. Das TREMOD-Trendszenario setzt auf vorläufigen Verkehrsleistungsstatistiken oder Trends für 2023 auf. Somit ist im Zeitraum 2019 bis 2023 die reale Entwicklung bereits weitgehend abgebildet. Für die weitere Entwicklung bis 2036 müssen Annahmen getroffen werden, die an das aktuelle Bezugsjahr 2023 anknüpfen:

- ▶ Die Verkehrsleistungen des MIV sind 2036 immer noch niedriger als 2019, jedoch um 7,9% höher als 2023. Es wird von einem linearen Wachstum bis 2036 ausgegangen.
- ▶ Es wird angenommen, dass alle Busverkehre und der Bahnen im Nahverkehr bis 2025 das Niveau von 2019 wieder erreicht haben. Danach steigen die Verkehrsleistungen bis 2036 linear weiter an. Für Busse und kommunale Bahnen wird die relative Verkehrsleistungsentwicklung des ÖSPV bzw. – für den Eisenbahnpersonennahverkehr - des Eisenbahnverkehrs aus der „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2022“ angenommen.
- ▶ Der Schienenpersonenfernverkehr hatte bereits 2023 das Niveau von 2019 überschritten. Bis 2036 wird ein linearer Anstieg angenommen.
- ▶ Der Güterverkehr auf Straße und Schiene ist 2023 gegenüber dem Vorjahr zurückgegangen und lag leicht dem Niveau von 2019. Von 2023 bis 2036 wird ein linearer Anstieg angenommen.
- ▶ Die Binnenschifffahrt lag 2023 unter dem Niveau von 2019. Die „Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2022“ geht von einer leichten Zunahme bis 2036 aus. Es wird ebenfalls von einer linearen Zunahme zwischen 2023 und 2036 ausgegangen.
- ▶ Der Flugverkehr wird in der „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2022“ nur teilweise erfasst. Es sind nur Prognosen für die territorialen Personenverkehrsleistungen ohne Differenzierung nach Inlands- und grenzüberschreitenden Flugverkehr enthalten. Die Entwicklung musste daher mit eigenen Annahmen und anderen Quellen ermittelt werden (siehe Kapitel 4.6.1).

Gegenüber der TREMOD-Version 6.43 ergeben sich Änderungen aufgrund des aktualisierten Startjahres 2023. Dabei wurde die weitere Entwicklung bis 2036 an die Verkehrsleistungen im neuen Ausgangsjahr 2023 angepasst und bis 2036 interpoliert. Dadurch ergeben sich in den Zwischenjahren (hier dargestellt 2025 und 2030) z.T. andere Verkehrsleistungen als in der Vorversion. So sind etwa die Verkehrsleistungen im Güterverkehr aufgrund des niedrigen Niveaus 2023 auch in den Folgejahren niedriger (2025 um fast 7%, 2030 um fast 3.5%). Beim Personenverkehr sind die Unterschiede dagegen eher gering.

Die weitere Verkehrsleistungsentwicklung 2036 bis 2050 folgt der Entwicklung der „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2022“. Dabei werden die Fünfjahreseckwerte der Verkehrsprognose zwischen den Jahren 2036 und 2051 übernommen und die Zwischenjahre linear interpoliert.

Die Verkehrsleistungen des Trendszenarios sind in Tabelle 76 dargestellt.

Tabelle 76: Verkehrsleistungsentwicklung 2019-2050

In Mrd. Pkm (Personenverkehr) bzw. Mrd. tkm (Güterverkehr)

	2019	2023	2025	2030	2040	2050	2019-2030	2030-2050
Personenverkehr davon:	1.129	1.005	1.047	1.098	1.188	1.243	-2,8%	13,2%
Straße	1.012	886	919	950	1.019	1.066	-6,1%	12,1%
MIV	917,4	815,4	825,5	850,3	910,4	948,8	-7,3%	11,6%
BUS	94,1	71,0	93,8	99,9	108,2	116,7	6,2%	16,8%
Fernlinienbus	4,1	2,4	4,2	4,4	4,8	5,1	7,1%	15,9%
Nahlinienbus	38,3	36,1	37,3	40,2	44,0	47,5	4,9%	18,3%
Sonst. Busse	51,6	32,6	52,3	55,3	59,4	64,1	7,1%	15,9%
Schiene	118,0	118,3	127,7	147,6	169,7	177,2	25,1%	20,0%
PNV DB	41,6	37,5	40,2	47,1	54,7	56,9	13,1%	20,8%
PNV NE	14,5	19,7	21,1	24,7	28,7	29,8	70,7%	20,8%
PFV	43,9	45,2	48,5	56,8	66,0	68,6	29,3%	20,8%
SSU-Bahnen	18,0	15,9	17,9	19,1	20,3	21,9	6,2%	14,8%
Güterverkehr davon:	678,7	648,3	667,2	747,5	884,8	981,0	10,1%	31,2%
Straße	498,6	481,9	495,2	561,5	678,6	759,0	12,6%	35,2%
Schiene	129,2	124,9	129,4	140,6	157,2	170,4	8,8%	21,2%
Schiene DB	60,7	51,9	53,8	58,4	65,3	70,8	-3,8%	21,2%
Schiene NE	68,5	73,0	75,6	82,2	91,9	99,6	19,9%	21,2%
Binnenschiff	50,9	41,5	42,6	45,5	49	51,6	-10,6%	13,3%
Abgehender Flugverkehr								
Personenverkehr davon:	262,7	219,9	266,8	287,1	327,5	367,9	9,3%	28,1%
National	10,6	7,5	10,6	10,3	9,7	8,9	-2,8%	-13,6%
..International	252,1	212,4	256,2	276,8	317,8	359,0	9,8%	29,7%
Güterverkehr davon	12,2	12,7	12,2	11,9	11,3	10,5	-2,2%	-12,2%

	2019	2023	2025	2030	2040	2050	2019-2030	2030-2050
..National	0,0497	0,0498	0,0493	0,0476	0,0438	0,0398	-4,2%	-16,4%
..International	12,2	12,6	12,1	11,9	11,3	10,4	-2,2%	-12,2%

Quellen: Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2022, eigene Annahmen.

4.3 Straßenverkehr

4.3.1 Annahmen zur Fahrleistungsentwicklung im Straßenverkehr

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

- ▶ Pkw und motorisierte Zweiräder: Bei unveränderter Auslastung verläuft die Fahrleistungsentwicklung der Pkw proportional zur Verkehrsleistungsentwicklung.
- ▶ Busse: 2024 werden die Fahrleistungen von 2019 wieder erreicht; danach steigen sie proportional zur Verkehrsleistung an.
- ▶ Leichte Nutzfahrzeuge: Die „Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2022“ geht von einem deutlichen Anstieg der Fahrleistungen bis 2050 aus (+78 % gegenüber 2019). Diese Annahmen werden im Trendszenario übernommen.
- ▶ Schwere Nutzfahrzeuge: Die Fahrleistungen nehmen in der „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2022“ etwas weniger zu als die Transportleistungen. Diese Annahme wird im Trendszenario übernommen. Die mittlere Auslastung pro Fahrzeug steigt daher leicht an.
- ▶ Die übrigen Kfz orientieren sich bei den leichten Fahrzeugen (<3,5t zul. GG) an der Fahrleistungsentwicklung der Pkw, bei den größeren Fahrzeugen bleibt die Fahrleistung gegenüber 2022 konstant.

Die angenommenen Fahrleistungen sind in Tabelle 77 dargestellt.

Tabelle 77: Entwicklung der Fahrleistungen 2019-2050

	FL gesamt (Mrd. km)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2019	784,4	644,8	14,8	4,6	53,7	63,8	2,6
2022	703,1	563,1	14,5	3,7	56,1	63,2	2,4
2023	709,9	572,1	14,6	4,0	56,4	60,5	2,4
2025	722,9	579,0	14,8	4,8	59,9	61,9	2,4
2030	757,2	596,3	15,3	5,0	68,9	69,2	2,5
2040	828,8	638,5	16,4	5,3	84,3	81,7	2,6
2050	874,4	665,4	17,1	5,7	94,5	89,0	2,6
2019-2030	-3,5%	-7,5%	3,1%	8,8%	28,4%	8,4%	-6,3%
2030-2050	15,5%	11,6%	11,8%	14,0%	37,2%	28,7%	6,1%

Quelle: Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2022, eigene Annahmen.

4.3.2 Entwicklung der Fahrzeugflotten

Das folgende Kapitel beschreibt die Annahmen zur Entwicklung der Fahrzeugflotten des Trendszenarios. Im Fokus steht die Entwicklung der Anteile der verschiedenen Antriebsarten bei den einzelnen Fahrzeugkategorien an den Neuzulassungen, welche anhand bisheriger Trends, relevanter politischer Instrumente und sonstiger Marktbeobachtungen abgeleitet wird.

Der zukünftige Fahrzeugbestand wird in TREMOD mithilfe eines Flottenmodells berechnet, welches auf Neuzulassungen und Überlebenskurven basiert. Letztere wurden in TREMOD 6.23 aktualisiert (Allekotte et al. 2020) und in dieser Version nicht angepasst.

4.3.2.1 Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge

Personenkraftwagen

Die Pkw-Neuzulassungen bis einschließlich 2023 sind durch die KBA-Statistik gegeben und lagen im Jahr 2023 bei knapp 2,9 Millionen Pkw. Ein Viertel der Neuzulassungen hatten einen Plug-In- oder batterieelektrischen Antrieb (Tabelle 80).

Für den Zeitraum 2024-2050 liegen die Neuzulassungszahlen im Bereich von 2,7-3,2 Mio. Pkw pro Jahr für das gesamte Szenario. Die Anteile der Antriebsarten an den Pkw-Neuzulassungen (insbesondere BEV) wird anhand der CO₂-Regulierung der EU (Verordnung 2019/631) mit ihrer Anpassungen (2023/851) hergeleitet, siehe (EU 2019a), (Europäische Kommission 2023) sowie (EU 2023a). Die Technologieanteile werden so angesetzt, dass die Flottengrenzwerte herstellerübergreifend unter Berücksichtigung vom durchschnittlichen Fahrzeuggewicht und möglichen Gutschriften für Übererfüllung eingehalten werden. Durch das geplante „Verbrennerverbot“ ab 2035 wird sich das Anforderungsniveau der Gesetzgebung deutlich verschärfen. Ab dem Jahr 2035 werden im Szenario daher lediglich BEV neu zugelassen. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor zum ausschließlichen Betrieb mit synthetischen oder biogenen Kraftstoffen werden im Szenario nicht berücksichtigt.

Der Hochlauf von BEV erfolgt im aktualisierten Trendszenario geringfügig langsamer als im vorherigen Szenario. Die CO₂-Flottengrenzwerte werden in jedem Szenarienjahren eingehalten, siehe Abschnitt 4.3.3.1.. Die angenommenen Anteile an den Neuzulassungen sind in der folgenden Tabelle gegeben.

Tabelle 78: Anteil der Neuzulassungen der Pkw im Trendszenario nach Antriebsart

Jahr	Otto (inkl. HEV)	Diesel (inkl. HEV)	CNG & LPG (inkl. HEV)	PHEV	BEV
2021	48 %	25 %	1 %	12 %	14 %
2022	44 %	24 %	1 %	14 %	18 %
2023	50 %	24 %	1 %	6 %	18 %
2024	50 %	25 %	1 %	6 %	18 %
2025	41 %	20 %	<1 %	5 %	35 %
2026	39 %	19 %	<1 %	5 %	38 %
2027	37 %	18 %	<1 %	4 %	41 %
2028	35 %	17 %	<1 %	4 %	44 %

Jahr	Otto (inkl. HEV)	Diesel (inkl. HEV)	CNG & LPG (inkl. HEV)	PHEV	BEV
2029	29 %	14 %	<1 %	4 %	53 %
2030	22 %	10 %	<1 %	3 %	65 %
2031	19 %	9 %	<1 %	2 %	69 %
2032	17 %	8 %	<1 %	2 %	72 %
2033	15 %	7 %	<1 %	2 %	76 %
2034	9 %	4 %	<1 %	1 %	86 %
≥2035	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %

Quellen: bis 2023 nach KBA-Statistik; 2024 abgeschätzt anhand KBA-Statistik für Januar und Februar 2024; nach 2024 Annahmen. Anmerkung: Werte gerundet, Zahlenwerte kleiner 0,5 % werden mit <1% gekennzeichnet.

Aus dem steigenden Anteil der elektrischen Fahrzeuge resultiert eine Verdrängung der konventionellen Antriebe. Hierbei wird angenommen, dass Otto- und Dieselmotoren im selben Maße hiervon betroffen sind und somit deren Verhältnis an den Neuzulassungsanteilen konstant auf dem Niveau von 2023 gehalten wird (ca. 2 zu 1 Otto/Diesel). Der Anteil von CNG- und LPG-Pkw ist bereits im Jahr 2023 vernachlässigbar klein (<1 %) und wird rückläufig angenommen. Indes werden Wasserstofffahrzeuge weiterhin keine nennenswerten Anteile verbuchen. Hintergrund sind die aktuell und in den nächsten Jahren fehlende Infrastruktur, das mangelnde Fahrzeugangebot sowie die hohen Betriebskosten und der im Verhältnis zu BEV hohe Primärenergieeinsatz.

Anhand der Neuzulassungszahlen und der technologiespezifischen Überlebenskurven können die Anteile der Technologien am Pkw-Bestand über den gesamten Zeitraum des Szenarios ermittelt werden. Der gesamte Pkw-Bestand stagniert im Szenario. Zwar werden ab dem Jahr 2035 keine Pkw mit Verbrennungsmotor neu zugelassen, jedoch weisen sie in diesem Jahr immer noch einen Anteil am Bestand von 57 % (ohne PHEV) auf. Der Bestand an BEV und PHEV liegt im Jahr 2025 bei ca. 3,9 Mio. und im Jahr 2030 bei ca. 10,7 Mio. Fahrzeugen. Im alten Szenario wird das Ziel der Bundesregierung von 15 Mio. Elektro-Pkw im Jahr 2030 (SPD et al. 2021) mit 14 Mio. knapp verfehlt. Im neuen Szenario ist diese Lücke nun deutlich größer. Die Ergebnisse sind in Tabelle 79 dargestellt.

Tabelle 79: Entwicklung der Pkw-Bestände im Trendszenario bis 2050

Jahr	Otto (inkl. HEV)	Diesel (inkl. HEV)	CNG & LPG (inkl. HEV)	PHEV	BEV	Pkw gesamt
2020	31,9 Mio.	15,2 Mio.	0,4 Mio.	0,2 Mio.	0,2 Mio.	48,0 Mio.
2025	29,9 Mio.	13,4 Mio.	0,3 Mio.	1,3 Mio.	2,6 Mio.	47,4 Mio.
2030	26,3 Mio.	10,3 Mio.	0,2 Mio.	1,6 Mio.	9,1 Mio.	47,5 Mio.
2035	20,1 Mio.	6,9 Mio.	0,1 Mio.	1,3 Mio.	19,5 Mio.	47,9 Mio.
2040	12,8 Mio.	3,6 Mio.	0,1 Mio.	0,8 Mio.	31,2 Mio.	48,5 Mio.
2045	7,0 Mio.	1,7 Mio.	<0,1 Mio.	0,4 Mio.	39,7 Mio.	48,8 Mio.
2050	3,2 Mio.	0,7 Mio.	<0,1 Mio.	0,2 Mio.	45,2 Mio.	49,1 Mio.

Quelle: eigene Berechnung

Leichte Nutzfahrzeuge

Die absoluten LNF-Neuzulassungen im 2023 lagen laut KBA-Statistik bei gut 250.000 Fahrzeugen. Für den Zeitraum 2024-2050 werden jährliche Neuzulassungszahlen in Höhe von 200.000-300.000 Fahrzeugen angenommen. Für die Anteile der Antriebsarten an den LNF-Neuzulassungen wird – wie bei den Pkw – die CO₂-Regulierung der EU herangezogen, um die Neuzulassungsanteile herzuleiten. Im Szenario werden ab dem Jahr 2035 lediglich BEV neu zugelassen. Sowohl die Anteile von BEV als auch von Hybridfahrzeugen (inkl. PHEV) sind bei LNF bis 2023 deutlich niedriger als bei den Pkw. Damit erfolgt bei LNF im Szenario ein steilerer Hochlauf von BEV als bei Pkw. PHEV weisen im Jahr 2023 lediglich einen geringen Anteil von unter einem Prozent auf; zum Vergleich lag der Wert bei Pkw bei 6 %. Demnach werden bei LNF keine nennenswerten Anteile im Szenario angenommen. Die CO₂-Flottengrenzwerte werden in jedem Szenarienjahr eingehalten, siehe Abschnitt 4.3.3.1. Die angenommenen Anteile an den Neuzulassungen sind in der folgenden Tabelle gegeben.

Tabelle 80: Anteil der Neuzulassungen der LNF im Trendszenario nach Antriebsart

Jahr	Otto* (inkl. HEV)	Diesel (inkl. HEV)	CNG (inkl. HEV)	PHEV	BEV
2021	5 %	90 %	<1 %	<1 %	5 %
2022	6 %	86 %	<1 %	<1 %	8 %
2023	7 %	85 %	<1 %	<1 %	8 %
2024	6 %	80 %	<1 %	<1 %	14 %
2025	5 %	70 %	<1 %	<1 %	25 %
2026	5 %	67 %	<1 %	<1 %	28 %
2027	5 %	65 %	<1 %	<1 %	31 %
2028	5 %	62 %	<1 %	<1 %	34 %
2029	4 %	53 %	<1 %	<1 %	43 %
2030	3 %	42 %	<1 %	<1 %	55 %
2031	3 %	38 %	<1 %	<1 %	59 %
2032	2 %	34 %	<1 %	<1 %	64 %
2033	2 %	30 %	<1 %	<1 %	68 %
2034	1 %	17 %	<1 %	<1 %	82 %
≥2035	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %

Quellen: bis 2023 nach KBA-Statistik; danach Annahmen Trendszenario. Anmerkungen: Werte gerundet, Zahlenwerte kleiner 0,5 % werden mit <1% gekennzeichnet. *LPG-Fahrzeuge werden den Otto-Fzg. zugeteilt.

Aus dem steigenden Anteil der elektrischen Fahrzeuge resultiert eine Verdrängung der sonstigen Antriebe. Das Verhältnis der sonstigen Antriebe zueinander wird konstant gelassen. Wasserstofffahrzeugen werden analog zu den Pkw-Annahmen keine nennenswerten Anteile verbuchen.

Anhand der Neuzulassungszahlen und der technologiespezifischen Überlebenskurven können die Anteile der Technologien am LNF-Bestand über den gesamten Zeitraum des Szenarios ermittelt werden. Der absolute Bestand steigt im Szenario weiterhin leicht an. Zwar werden ab dem

Jahr 2035 keine LNF mit Verbrennungsmotor zugelassen, jedoch weisen sie in diesem Jahr immer noch einen Anteil am Bestand von 65 % (ohne PHEV) auf. Der Bestand an BEV und PHEV liegt im Jahr 2025 bei ca. 126.000 und im Jahr 2030 bei ca. 450.000 Fahrzeugen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 79 dargestellt.

Tabelle 81: Entwicklung der LNF-Bestände im Trendszenario bis 2050

Jahr	Otto* (inkl. HEV)	Diesel (inkl. HEV)	CNG (inkl. HEV)	PHEV	BEV	LNF gesamt
2020	161.000	2.612.000	13.000	<1.000	27.000	2.812.000
2025	167.000	2.813.000	10.000	1.000	125.000	3.116.000
2030	151.000	2.476.000	6.000	<1.000	449.000	3.084.000
2035	118.000	1.863.000	4.000	<1.000	1.084.000	3.069.000
2040	72.000	1.117.000	2.000	<1.000	1.908.000	3.100.000
2045	40.000	602.000	1.000	<1.000	2.489.000	3.132.000
2050	20.000	292.000	<1.000	<1.000	2.843.000	3.155.000

Quelle: eigene Berechnung. Anmerkungen: Werte auf 1.000er-Stelle gerundet. *Inkl. LPG.

4.3.2.2 Schwere Nutzfahrzeuge und Busse

Im Jahr 2023 wurden laut KBA Neuzulassungen 39.399 Lkw mit einem Gesamtgewicht >3,5 t und 42.426 Sattelzugmaschinen zugelassen. Für die Folgejahre wird in Kopplung an die zunehmende Fahrleistung auch eine Zunahme der jährlichen SNF-Neuzulassungen angenommen. Im Jahr 2050 werden für Lkw >3,5 t 45.000, für Sattelzüge 52.000 Neuzulassungen angenommen.

Bei den schweren Nutzfahrzeugen ist Diesel aktuell immer noch die dominierende Antriebsart. Dennoch stieg insbesondere der Neuzulassungsanteil von BEV-Lkw in den letzten Jahren, vor allem bei den Fahrzeugen im Bereich 3,5-12t zGG, wo er laut KBA im Jahr 2023 etwa 9 % an den Neuzulassungen ausmachte. Aufgrund der geringeren Reichweiten kommen solche Lkw mit kleineren Batterien aus, was sich positiv auf die Anschaffungskosten auswirkt und für den Einsatz im Stadtverkehr kaum Nachteile mit sich bringt. Bei größeren Fahrzeugen war der Anteil von Elektroantrieben hingegen deutlich geringer (siehe Tabelle 82). Das Fahrzeugangebot hat sich in den letzten Jahren stark ausgeweitet, wie aus Marktbeobachtungen des ifeu im Rahmen des Projekts my-e-roads hervorgeht (My eRoads 2022). Während es vor dem Jahr 2018 elektrische Lkw in Deutschland lediglich als Prototypen oder Kleinserien gab, waren zum Oktober 2022 bereits über 60 Modelle verschiedener Hersteller, darunter MAN, IVECO, Scania, Volvo, Mercedes Benz und DAF, am Markt verfügbar. Mehr als 30 weitere Modelle waren angekündigt und umfassen vor allem schwere Fahrzeuge mit mehr als 26 t zulässigen Gesamtgewicht für den Fernverkehr. Die verfügbaren Elektro-Lkw haben großenteils Reichweiten im Bereich bis etwa 300 km (tendenziell Verteilerverkehre), die Reichweiten der angekündigten Fahrzeuge liegen überwiegend darüber. Vor allem für den Fernverkehr wurden diverse Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten von über 500 km angekündigt⁹. Verschiedene Hersteller, z.B. Daimler, Scania, MAN, IVECO haben ambitionierter ZEV-Anteile an den Neuzulassungen in der Bandbreite von 20%-60% angekündigt (Transport & Environment 2021). Die (NOW GmbH 2023) prognostiziert ausgehend von Einzelgesprächen mit den Fahrzeugherstellern bis zum Jahr 2030 bei den Lkw >12 t

⁹ Brennstoffzellenfahrzeuge werden im Trendszenario nicht berücksichtigt

einen Neuzulassungsanteil von ZEVs von 74% (davon 57% BEV, 17% FCEV). Allerdings basieren diese Prognosen auf Ankündigungen, deren Umsetzung auf freiwilliger Basis erfolgt.

Um die Markteinführung von Elektroantrieben insbesondere bei den größeren Nutzfahrzeugen zu unterstützen, wurde im Jahr 2021 das Förderprogramm des Bundesverkehrsministeriums (BMDV) für Klimaschonende Nutzfahrzeuge und ihre Infrastruktur (KsNI-Programm) ins Leben gerufen und mit einem ersten Förderaufruf im August 2021 gestartet. Es übernimmt 80 % der anfallenden Mehrkosten von elektrisch angetriebenen Lkw gegenüber vergleichbaren Diesel-Neufahrzeugen sowie 80 % der Kosten für Ladeinfrastruktur. Bis September 2022 wurden gemäß Erhebungen der Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) GmbH 921 BEV- und 290 Brennstoffzellen-Lkw mit dem Programm gefördert, wobei ein beträchtlicher Teil der Fördermittel in die 439 Fahrzeuge der Größenklasse N3 (>12 t) geflossen sein dürfte (BMDV 2022). Im Jahr 2024 wurde das Förderprogramm aufgrund von Haushaltskürzungen gestoppt (Krenzer 2024)

Inwiefern die europäische CO₂-Gesetzgebung für SNF die Marktdurchdringung von Nullemissionsfahrzeugen erfordert, wurde unter anderem in Berechnungen des Fraunhofer ISI (Breed et al. 2021) untersucht. In einem Szenario, in welchem Hersteller weiterhin verstärkt auf Verbrenner setzen und diese verbrauchsoptimieren, kann der Zielwert von -30% bei den spezifischen CO₂ Emissionen der Neuzulassungen im Jahr 2030 gegenüber 2020 mit nur etwa 4 % ZEV-Anteil an den Neuzulassungen erreicht werden. Sollten die Hersteller jedoch verstärkt auf Elektroantriebe setzen und die Technologie der Verbrennungsmotoren nicht nennenswert weiterentwickelten, wäre ein ZEV-Anteil von 22 % an den Neuzulassungen nötig.

Der Projektionsbericht 2024 (Öko-Institut und IREES 2024) weist bei den SNF insgesamt mit ca. 50% im MMS deutliche höhere ZEV-Anteile für das Jahr 2030 aus. Aus den Wirkungsabschätzungen der Instrumente im Projektionsbericht 2024 ist davon auszugehen, dass die Differenzierung der Lkw-Maut (Richtlinie (EU) 2022/362) zusammen mit den CO₂-Grenzwerten den größten Einfluss auf die Elektrifizierung der SNF hat. Die Wirkung der Förderprogramme (siehe voriger Abschnitt) sind laut den Modellierungen des Projektionsbericht hingegen geringer. Allerdings wird die Verfügbarkeit der erforderlichen Ladeinfrastruktur, welche bis 2050 flächendeckend vorhanden ist, vorausgesetzt.

Das TREMOD-Trendszenario nimmt daher einen Anteil von 51% BEV bei SNF insgesamt im Jahr 2030 an und liegt damit innerhalb der Bandbreite des Projektionsberichtes 2024 und der Herstellerangaben. Wie bei den bisherigen Zulassungen ist der BEV-Anteil auch zukünftig bei Lkw ≤12 t deutlich höher als bei Lkw >12 t und Sattelzügen. Ab dem Jahr 2030 nehmen die Elektroanteile in allen Größenklassen deutlich zu, so dass bei den Lkw ≤12 t bereits ab 2040 und bei den Sattelzügen im Jahr 2050 nur noch elektrische Fahrzeuge zugelassen werden (siehe Tabelle 82). Für Erdgas-Lkw wird angenommen, dass die Zulassungen sinken und ab 2030 keine Fahrzeuge mehr zugelassen werden.

Tabelle 82: Anteil der Neuzulassungen der SNF im Trendszenario nach Antriebsart

Baujahr	Diesel	CNG/LNG	BEV
Lkw ≤ 12 t			
2022	95%	0,3%	4,6%
2023	90%	0,5%	9,3%
2025	70%	0,2%	30%

Baujahr	Diesel	CNG/LNG	BEV
2030	20%	0,0%	80%
2040	0,0%	0,0%	100%
2050	0,0%	0,0%	100%
Lkw > 12 t			
2022	97%	2,1%	0,6%
2023	96%	2,6%	1,0%
2025	89%	1,3%	10%
2030	50%	0,0%	50%
2040	5,0%	0,0%	95%
2050	0,0%	0,0%	100%
Sattelzüge			
2022	97%	3,0%	0,2%
2023	98%	1,3%	0,7%
2025	92%	0,7%	7%
2030	60%	0,0%	40%
2040	10%	0,0%	90%
2050	0,0%	0,0%	100%

Quellen: 202 KBA-Daten, danach eigenen Annahmen.

Bei den Bussen wurden im Jahr 2023 laut KBA Neuzulassungen 5.493 Busse neu zugelassen. Begründet durch den angenommenen Anstieg der Fahrleistung steigen zukünftig die Neuzulassungen und erreichen im Jahr 2050 einen Wert von ca. 6.400 Neuzulassungen.

Wie bei den Lkw zeigt sich bei den Bussen in den letzten Jahren ein starker Trend zu alternativen Antrieben und insbesondere hin zur Elektromobilität. Am höchsten ist die Durchdringung bei den Linienbussen, welche einen Anteil von 18% Elektrofahrzeugen im Jahr 2023 aufwiesen. Wesentliche Instrumente unterstützen diese Entwicklung weiter, darunter z.B. die „Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr“ des Bundes sowie das „Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz vom 9. Juni 2021 (SaubFahrzeugBeschG)“ (Umsetzung der europäischen Clean Vehicle Directive, kurz CVD). Laut dem „E-Bus Radar“ dürfte der E-Busbestand alleine aufgrund der aktuellen Bestellungen der Verkehrsunternehmen bis zum Jahr 2030 von den im Jahr 2022 1762 Elektrobussen (davon 145 Wasserstoffbusse) um weitere 6.536 Elektrobusse steigen (PwC 2023).

Für TREMOD wird angenommen, dass die BEV-Neuzulassungsanteile für alle Linienbusse in den Folgejahren ab 2025 weiter steigen. Inwiefern die Mindestanforderungen der CVD von 22,5% ab August 2021 erfüllt werden, ließ sich nicht überprüfen¹⁰. Bis 2030 steigt der NZL-Anteil auf 64%, ab 2040 werden fast nur noch Elektrobusse zugelassen. Entsprechend geht der Anteil von

¹⁰ Da laut E-Bus-Radar nur ca. 35.000 der über 54.000 ÖPNV-Bussen unter die CVD fallen, könnten die Neuzulassungsanteile von Elektrobussen an diesen Bussen auch höher sein als an der Gesamtflotte, welche TREMOD abbildet.

Diesel- und Gas-Bussen zukünftig weiter zurück. Plug-In-Hybrid und Wasserstoffbusse werden bisher nicht in TREMOD berücksichtigt, machen jedoch bei den aktuellen Zulassungen und Bestellungen einen geringen Anteil der alternativen Antriebe aus.

Für die Reise- und Fernlinienbusse wird mangels konkreter Daten dieselbe Entwicklung wie bei den Sattelzugmaschinen angenommen.

Tabelle 83: Anteil der Neuzulassungen der Linien- und Reisebusse im Trendszenario nach Antriebsart

Baujahr	Diesel	Diesel HEV	CNG	BEV
Nahlinienbusse				
2022	59%	24%	0,7%	16%
2023	52%	29%	0,8%	18%
2025	38%	30%	0,6%	31%
2030	3%	33%	0%	64%
2040	0%	3%	0%	97%
2050	0%	0%	0%	100%
Fernlinien- und Reisebusse				
2022	99%	N/A	N/A	0%
2023	99%	N/A	N/A	0,9%
2025	92%	N/A	N/A	7,0%
2030	60%	N/A	N/A	40%
2040	10%	N/A	N/A	90%
2050	0,0%	N/A	N/A	100%

4.3.2.3 Motorisierte Zweiräder und sonstige Fahrzeugkategorien

Im Jahr 2023 wurden laut KBA 222.046 Krafträder neuzugelassen. Die Neuzulassungen von Kleinkrafträdern nach Antrieben werden vom KBA nicht erfasst, laut dem europäischen Verband ACEM wurden jedoch alleine im Zeitraum Januar bis Dezember 2023 ca. 27.000 Mopeds in Deutschland zugelassen, wobei elektrische Mopeds nicht erfasst werden. Für TREMOD werden daher jährliche Neuzulassungen von 40.000 Kleinkrafträdern angenommen, was daher etwas unter der Annahme von 50.000 bis einschließlich Version TREMOD 6.23 liegt.

Die Neuzulassungen von Krafträdern und Kleinkrafträdern umfassen neben Benzin zunehmend batterieelektrische Fahrzeuge. Bei den Krafträdern waren im Jahr 2023 ca. 8% der Neuzulassungen batterieelektrisch und verzeichneten damit einen Rückgang gegenüber dem Jahr 2022 mit 15%. Die Neuzulassungen von Mopeds nach Antrieben wird zwar vom KBA nicht erfasst, jedoch zeigen Zulassungsdaten des europäischen Verbandes ACEM, dass der Elektroanteil der Länder Belgien, Frankreich, Niederlande und Spanien im Zeitraum Januar bis September 2023 insgesamt bei 35 % lag und damit gegenüber dem Jahr 2022 leicht gesunken ist (ACEM 2024). Inwiefern der Rückgang bei der Zulassung von elektrischen MZR eine Stagnation des Markthochlaufs

andeutet, lässt sich aufgrund des kurzen Zeitraums nicht beurteilen, zumal diese in den Jahren zuvor stark angestiegen sind. Im TREMOD-Trendszenario wird daher angenommen, dass der Anteil elektrischer Zweiräder zukünftig weiter ansteigt. Bei den Kleinkrafträdern, z.B. Roller, werden ab 2030, bei Krafträdern ab 2040 nur noch e-Fahrzeuge verkauft (Tabelle 84).

Tabelle 84: Anteil der Neuzulassungen motorisierter Zweiräder im Trendszenario nach Antriebsart

Baujahr	Otto	BEV	Otto	BEV
	Krafträder		Kleinkrafträder	
2022	85%	15%	62%	38%
2023	92%	7,6%	65%	35%
2025	80%	20%	43%	57%
2030	50%	50%	0%	100%
2040	0%	100%	0%	100%
2050	0%	100%	0%	100%

Quelle: Bis 2023 für Krafträder KBA, für sonstige Werte eigene Annahmen

Bei den übrigen Kfz wurden im Jahr 2022 8053 Fahrzeuge $\leq 3,5$ t (UeKfzl) mit einem BEV-Anteil von 6% und 13.024 Fahrzeuge mit $>3,5$ t (UeKfzs) zugelassen und einem BEV-Anteil von 2% zugelassen. Bei den restlichen Fahrzeugen handelt es sich Dieselfahrzeuge. Die Entwicklung im Trendszenario lehnt sich für Uekfzl an LNF und bei den Uekfzs an die Lkw an.

4.3.3 Entwicklung der Energieeffizienz

4.3.3.1 Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge

Personenkraftwagen

Gemäß den Daten des CO₂-Monitoring (im NEFZ) sind die durchschnittlichen CO₂-Emissionen von Neufahrzeugen in Deutschland seit 1990 deutlich gesunken. Seit 2015 stagniert jedoch der NEFZ- bzw. WLTP-Wert bei reinen Otto- und Diesel-Pkw. Dies ist in erster Linie auf den gestiegenen Anteil leistungsstarker Fahrzeuge (insb. SUV) zurückzuführen. Durch den steigenden Anteil an HEV, PHEV und BEV konnten trotz der zuletzt ausgebliebenen Verbrauchsverbesserungen (im Testzyklus) bei den Otto- und Diesel-Pkw die Flottengrenzwerte der Pkw eingehalten werden.

Im Trendszenario wird angenommen, dass reine Otto- und Diesel-Pkw (ohne HEV) keine Effizienzgewinne (Verbrauch pro km) aufweisen. Es wird ab dem Jahr 2025 der mittlere Verbrauch zwischen 2019 und 2023 verwendet. Für das Jahr 2024 erfolgt eine Abschätzung anhand der Daten Januar und Februar nach KBA. Es wird von einem steigenden Anteil von HEV ausgegangen. In TREMOD wird die Hybridisierung, sofern keine externe Lademöglichkeit vorliegt (PHEV), lediglich als Effizienzverbesserung definiert. HEV werden somit den konventionellen Otto- und Diesel-Fahrzeugen zugeteilt. Dies führt zu Verbrauchsminderungen der in TREMOD definierten Fahrzeugkategorien Otto-Pkw (inkl. HEV) und Diesel-Pkw (inkl. HEV). Die Steigerung der HEV-Anteile wird anhand der Entwicklung der letzten Jahre hergeleitet.

Sowohl beim WLTP als auch im Realbetrieb von HEV wird ein Verbrauchsvorteil von 9 % bei Otto und 3 % bei Diesel ggü. Verbrenner-Fahrzeugen ohne Hybridantrieb angenommen. Dieser

Vorteil deckt sich mit den Angaben einer internen KBA-Auswertung für NEFZ/WLTP für Realverbrauch.

Die folgende Tabelle fasst die CO₂-Emissionen nach NEFZ bis 2020 und danach WLTP sowie die HEV-Anteile (ohne PHEV) an den Otto- bzw. Diesel-Pkw zusammen. Angegeben werden nur die Verbesserungen bis 2035, da danach im Szenario keine Pkw mit Verbrennungsmotor zugelassen werden, siehe Abschnitt 4.3.2.1.

Tabelle 85: CO₂-Emissionen nach NEFZ/WLTP und Hybridanteile für Otto- und Diesel-Pkw 2005-2035

Jahr	Otto ohne HEV	Otto-HEV	Otto HEV-Anteil	Otto inkl. HEV	Diesel ohne HEV	Diesel-HEV	Diesel HEV-Anteil	Diesel inkl. HEV
2005	175 g/km	-	-	175 g/km	162 g/km	-	-	162 g/km
2010	151 g/km	-	-	151 g/km	147 g/km	-	-	147 g/km
2015	129 g/km	92 g/km	1%	129 g/km	132 g/km	106 g/km	<1%	132 g/km
2020	129 g/km	117 g/km	14%	127 g/km	140 g/km	135 g/km	12%	139 g/km
2021	148 g/km	138 g/km	23%	146 g/km	170 g/km	161 g/km	21%	168 g/km
2022	150 g/km	139 g/km	27%	148 g/km	165 g/km	160 g/km	24%	167 g/km
2023	147 g/km	137 g/km	32%	147 g/km	160 g/km	153 g/km	30%	164 g/km
2025	150 g/km	136 g/km	38%	145 g/km	166 g/km	160 g/km	35%	164 g/km
2030	150 g/km	136 g/km	71%	140 g/km	166 g/km	160 g/km	65%	162 g/km
2035	150 g/km	136 g/km	100%	136 g/km	166 g/km	160 g/km	95%	161 g/km

Quellen: bis 2023 Sonderauswertung KBA, nach 2023 eigene Ermittlung. Anmerkung: 2005-2020 nach NEFZ und 2021-2035 nach WLTP.

Die Verbräuche der sonstigen Antriebstechnologien (PHEV, LPG, CNG) werden konstant angenommen. Auch hier wird der mittlere Verbrauch der Jahre 2019-2023 verwendet.

Werden nun die Neuzulassungsanteile pro Fahrzeugtechnologie (siehe Abschnitt 4.3.2.1) herangezogen und mit den CO₂-Emissionen nach WLTP gewichtet, erhält man die CO₂-Flottenemissionen. Die Anteile wurden so gewählt, dass die Flottengrenzwerte unter den o. g. Effizienzentwicklungen eingehalten werden. Demnach entspricht der angesetzte Grenzwert den durchschnittlichen Flottenemissionen in TREMOD. Die folgende Tabelle stellt die CO₂-Flottengrenzwerte mitsamt der prozentualen Verbesserung ggü. 2021 dar.

Tabelle 86: CO₂-Flottengrenzwert für Pkw nach WLTP 2021-2035

Jahre	Flottengrenzwert
2021	110 g/km
2025-2029	93 g/km (-15%)
2030-2034	49 g/km (-55%)
≥2035	0 g/km (-100%)

Quellen: (EU 2019a), (Europäische Kommission 2023) sowie (EU 2023a).

Um die Realemissionen aus den WLTP-Werten abzuleiten, werden Zuschlagsfaktoren auf die Werte multipliziert. Diese wurden im Projekt (Tietge et al. 2020) abgeleitet.

Der reale Stromverbrauch von BEV wird konstant gelassen. Zwar sind Effizienzgewinne zu erwarten, jedoch stehen diese einem wahrscheinlichen Anstieg der Fahrzeuggewichte entgegen. Die folgende Tabelle fasst die angenommenen realen CO₂-Emissionen bzw. Stromverbräuche im elektrischen Betrieb von Pkw pro Neuzulassungsjahr zusammen. Bei Otto- und Diesel-Pkw resultieren aus der fortschreitenden Hybridisierung Effizienzgewinne. Bei LPG- und CNG-Pkw bleiben die realen spezifischen CO₂-Emissionen konstant. Bei PHEV resultiert eine Minderung durch den steigenden elektrischen Fahranteil. Die Verbräuche pro Betriebsmodus bleiben konstant.

Tabelle 87: Reale CO₂-Emissionen und Stromverbrauch bei Pkw-Neuzulassungen im Szenario

Jahr	Otto ¹	Diesel ¹	LPG	CNG	PHEV Otto ²	PHEV Diesel ²	BEV ³
2020	174 g/km	200 g/km	156 g/km	112 g/km	165 g/km & 201 Wh/km	206 g/km & 254 Wh/km	208 Wh/km
2021	172 g/km	204 g/km	153 g/km	106 g/km	165 g/km & 202 Wh/km	210 g/km & 256 Wh/km	228 Wh/km
2022	170 g/km	200 g/km	165 g/km	94 g/km	153 g/km & 202 Wh/km	191 g/km & 256 Wh/km	227 Wh/km
2023	167 g/km	193 g/km	166 g/km	93 g/km	153 g/km & 202 Wh/km	191 g/km & 256 Wh/km	230 Wh/km
2025	168 g/km	200 g/km	170 g/km	95 g/km	153 g/km & 202 Wh/km	191 g/km & 256 Wh/km	230 Wh/km
2030	163 g/km	198 g/km	170 g/km	95 g/km	153 g/km & 202 Wh/km	191 g/km & 256 Wh/km	230 Wh/km
2035	159 g/km	197 g/km	170 g/km	95 g/km	153 g/km & 202 Wh/km	191 g/km & 256 Wh/km	230 Wh/km

Anmerkungen: bis 2023 real, ab 2023 Szenario. Emissionen bei Verwendung von fossilen Brennstoffen (bei Beimischung von Biokraftstoffen weichen die Werte gering ab). Stromverbrauch BEV und PHEV inkl. Ladeverluste. ¹Inkl. HEV. ²Angegeben werden die realen spezifischen CO₂-Emissionen im Verbrennermodus sowie der Stromverbrauch im Strommodus. ³Wie HBEFA 4.2.

Leichte Nutzfahrzeuge

Gemäß den Daten des CO₂-Monitoring (im NEFZ) sind die durchschnittlichen CO₂-Emissionen in Deutschland seit 2013 gesunken. Im Trendszenario wird wie bei den Pkw keine Effizienzverbesserungen für Otto- und Diesel-LNF (ohne HEV) angenommen. Die Verbesserungen von Otto- und Diesel-LNF in TREMOD werden lediglich dadurch gesteigert, dass der Anteil von HEV (ohne PHEV) steigt, denn diese werden in TREMOD als Effizienzverbesserung definiert (s. o.). Der Hochlauf von HEV erfolgt hierbei deutlich zeitverzögert verglichen mit dem Hybridanteil bei Pkw. HEV weisen analog zu den Annahmen bei den Pkw einen Verbrauchsvorteil von 9 % bei Otto bzw. 3 % bei Diesel ggü. konventionellen Verbrennern auf. Die folgende Tabelle fasst die CO₂-Emissionen nach NEFZ und WLTP sowie die HEV-Anteile (ohne PHEV) an den Otto- bzw. Diesel-LNF zusammen. Angegeben werden nur die Verbesserungen bis 2035, da danach im Szenario keine LNF mit Verbrennungsmotor zugelassen werden, siehe Abschnitt 4.3.2.1.

Tabelle 88: CO₂-Emissionen nach NEFZ/WLTP und Hybridanteile für Otto- und Diesel-LNF 2015-2035

Jahr	Otto ohne HEV	Otto-HEV*	Otto HEV-Anteil	Otto inkl. HEV	Diesel ohne HEV	Diesel-HEV*	Diesel HEV-Anteil	Diesel inkl. HEV
2015	189 g/km	107 g/km	2%	187 g/km	188 g/km	108 g/km	<1%	188 g/km
2020	174 g/km	308 g/km	2%	176 g/km	177 g/km	161 g/km	<1%	177 g/km
2021	177 g/km	291 g/km	1%	178 g/km	217 g/km	223 g/km	<1%	217 g/km
2022	175 g/km	247 g/km	2%	176 g/km	211 g/km	217 g/km	<1%	211 g/km
2023	188	222 g/km	2%	189 g/km	216 g/km	224 g/km	<1%	216 g/km
2025	184 g/km	167 g/km	3%	160 g/km	220 g/km	213 g/km	<1%	220 g/km
2030	184 g/km	167 g/km	27%	151 g/km	220 g/km	213 g/km	24%	218 g/km
2035	184 g/km	167 g/km	51%	145 g/km	220 g/km	213 g/km	47%	217 g/km

Quellen: bis 2023 Sonderauswertung KBA, nach 2023 eigene Ermittlung. Anmerkungen: *Die Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge ist sehr gering, dadurch können große Sprünge entstehen; zudem können die zugelassenen HEV größer sein als die reinen Verbrennerfahrzeuge, sodass die Verbräuche höher sind. 2005-2020 nach NEFZ und 2021-2035 nach WLTP.

Für CNG-Fahrzeuge und Otto-PHEV werden keine Verbesserung nach dem Jahr 2023 angenommen. LPG- und Diesel-PHEV-LNF sind im Szenario nicht definiert. Allgemein sind die Anteile der drei genannten Segmente vernachlässigbar klein, siehe Abschnitt 4.3.2.1.

Werden nun die Neuzulassungsanteile pro Fahrzeugtechnologie (siehe Abschnitt 4.3.2.1) herangezogen und mit den CO₂-Emissionen nach WLTP gewichtet, erhält man die CO₂-Flottenemissionen. Die Anteile wurden so gewählt, dass die Flottengrenzwerte unter den o. g. Effizienzentwicklungen eingehalten werden. Demnach entspricht der angesetzte Grenzwert den durchschnittlichen Flottenemissionen in TREMOD. Die folgende Tabelle stellt die CO₂-Flottengrenzwerte mitsamt der prozentualen Verbesserung ggü. 2021 dar.

Tabelle 89: CO₂-Flottengrenzwert für LNF nach WLTP 2021-2035

Jahre	Flottengrenzwert
2021	180 g/km
2025-2029	153 g/km (-15%)
2030-2034	90 g/km (-50%)
≥2035	0 g/km (-100%)

Quellen: (EU 2019a), (Europäische Kommission 2023) sowie (EU 2023a).

Um die Realemissionen aus den WLTP-Werten abzuleiten, werden Zuschlagsfaktoren auf die Werte multipliziert. Diese wurden im Projekt (Tietge et al. 2020) abgeleitet. Für CNG-LNF werden die Faktoren von Otto-LNF übernommen.

Der Verbrauch von BEV wird nach dem Jahr 2023 wie bei Pkw konstant gelassen. Zwar sind auch hier Effizienzgewinne zu erwarten, jedoch stehen diese einem wahrscheinlichen Anstieg der Fahrzeuggewichte entgegen. Die folgende Tabelle fasst die angenommenen realen CO₂-Emissionen bzw. Verbräuche im elektrischen Betrieb von LNF pro Neuzulassungsjahr zusammen. Zu beachten ist, dass bei der Fahrzeugkategorie LNF drei unterschiedliche Größenklassen (M+N1-I,

N1-II und N1-III) zusammengefasst sind. Dies kann insb. bei Antriebstechnologien mit sehr geringen Anteilen zu großen Sprüngen zwischen den Jahren führen.

Tabelle 90: Reale CO₂-Emissionen und Stromverbrauch bei LNF-Neuzulassungen im Szenario

Jahr	Otto ¹	Diesel ¹	CNG	Otto-PHEV ²	BEV ³
2020	230 g/km	259 g/km	174 g/km	214 g/km & 402 Wh/km	419 Wh/km
2021	205 g/km	253 g/km	201 g/km	196 g/km & 355 Wh/km	421 Wh/km
2022	158 g/km	230 g/km	190 g/km	190 g/km & 355 Wh/km	428 Wh/km
2023	180 g/km	234 g/km	190 g/km	190 g/km & 385 Wh/km	421 Wh/km
2025	175 g/km	238 g/km	190 g/km	190 g/km & 385 Wh/km	421 Wh/km
2030	172 g/km	232 g/km	190 g/km	190 g/km & 385 Wh/km	421 Wh/km
2035	169 g/km	228 g/km	190 g/km	190 g/km & 385 Wh/km	421 Wh/km

Anmerkungen: bis 2023 real, nach 2023 Szenario. Stromverbrauch BEV und PHEV inkl. Ladeverluste. Emissionen bei Verwendung von fossilen Brennstoffen (bei Beimischung von Biokraftstoffen weichen die Werte gering ab). In TREMOD sind keine Diesel-PHEV- und LPG-LNF hinterlegt. ¹Inkl. HEV. ²Angegeben werden die realen spezifischen CO₂-Emissionen im Verbrennermodus sowie der Stromverbrauch im Strommodus. ³Wie HBEFA 4.2.

4.3.3.2 Schwere Nutzfahrzeuge und Busse

Mit der am 20. Juni 2019 veröffentlichten Verordnung (EU) 2019/1242 lag erstmals eine CO₂-Grenzwertgesetzgebung für neue SNF vor (EU 2019b). 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 % 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. Im Jahr 2023 veröffentlichte die EU-Kommission einen Vorschlag zur Revision der Flottengrenzwerte, welcher u.a. eine Verschärfung der Minderung im Jahr 2030 auf 45% und eine Minderung von 90% im Jahr 2040 vorsieht (EU 2023b). Dieser Vorschlag ist allerdings noch nicht beschlossen und wurde deshalb im Trendszenario nicht berücksichtigt.

Ein entscheidender Faktor zur Einhaltung der CO₂-Gesetzgebung ist neben der Entwicklung der Energieeffizienz der Verbrenner auch der Anteil von ZLEVs (Zero- and Low-Emission Vehicles), u.a. BEV, FCEV, oder PHEV, an den Neuzulassungen. Nach Berechnungen von (Breed et al. 2021) könnten die Hersteller unterschiedliche Strategien verwenden, um die Ziele zu erreichen, welche zu unterschiedlichen Mehrkosten für neue Verbrenner führen würden (für Kategorie 5 zwischen 3.600 € und 35.220 €). Die zukünftige Verbesserung bei den Verbrennern liegt entsprechend je nach Szenario zwischen 0,4% und 1,6% p.a, wobei im ersten Fall nur einzelne Maßnahmen wie verbesserte Hilfsaggregate und Aerodynamik und im letzten Fall alle derzeit verfügbaren Effizienzmaßnahmen, z.B. Hybridisierung, Leichtbau und Maßnahmen an Anhängern und Aufliegern enthalten sind. Der Projektionsbericht 2021 geht bei einem Nullemissionsfahrzeug (ZEV)-Anteil von 15% von einer Verbesserung um 1% p.a. aus.

Tabelle 91: Anteil von Nullemissions-Lkw und Reduktion des Kraftstoffverbrauchs für Verbrenner-Lkw im Jahr 2030 nach verschiedenen Szenarien

Quelle und Szenario	ZEV Anteil 2030 (SNF insgesamt)	Verbesserung Verbrenner
Projektionsbericht 2021 „MMS“	15%	11% (2020-2030) ~ 1%p.a.
Breed et al 2021 “ICEV-Focused”	4%	22,1-25,6% (2016-2030) ~ 1,4-1,6% p.a.
Breed et al 2021 “Low-Hanging Fruits”	13,7%	14,4-17% (2016 -2030) ~ 1-1,1% p.a.
Breed et al 2021 “ZEV-Focused”	22%	5,3-8,2% (2016-2030) ~ 0,4-0,6% p.a.

Quelle: (Repenning et al. 2021) (Breed et al. 2021), eigene Berechnungen

Für das TREMOD Trendszenario wird in Anbetracht verschiedener Herstellerankündigen eine hohe Elektrifizierungsrate von 21% über alle SNF, d.h. vergleichbar mit dem ZEV-Focused Szenario nach (Breed et al. 2021), angenommen. Demnach werden die CO₂-Grenzwerte gemäß Verordnung (EU) 2019/1242 überwiegend durch den steigenden Anteil von E-Lkw eingehalten und der spezifische Verbrauch der Verbrenner-Lkw sinkt zukünftig um ca. 0,5% p.a. Dies entspricht in etwa den Verbesserungen in der Vergangenheit, siehe (Heidt et al. 2019), und liegt damit deutlich niedriger als die in TREMOD 6.23 bzw. im HBEFA 4.2 bis 2030 angenommenen Verbesserungsrate. Für den Zeitraum nach 2030 wird wie bisher ebenfalls eine Verbesserung um 0,5% p.a. angenommen. Vereinfacht bezieht sich diese Minderung auf die Fzg.-km pauschal für alle SNF-Klassen. Für Elektrofahrzeuge wird bisher keine Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs angenommen, da eine Zunahme des Fahrzeuggewichtes aufgrund größerer Batterien die sonstigen Effizienzpotenziale kompensieren könnten¹¹.

Tabelle 92: Reduktion der spezifischen CO₂-Emissionen bei SNF im Trendszenario

Baujahr	SNF Diesel & Erdgas
2020-2025	-0,5 % p. a.
2025-2030	-0,5 % p. a.
2030-2050	-0,5 % p. a.

Quelle: eigene Annahmen

Für die Busse wird vereinfacht dieselbe Verbesserung bei Verbrennern wie bei den SNF übernommen, d.h. 0,5 %p.a. für Linien-, Fernlinien- und Reisebusse. Zwar unterscheiden sich die angenommenen Elektrifizierungsraten deutlich für Nahlinienbusse und sonstige Busse. Da für die CO₂-Gesetzgebung der Busse noch keine Details beschlossen wurden, lassen sich derzeit allerdings noch keine genaueren Annahmen treffen.

¹¹ Dieser Annahmen liegen interne Analysen aus dem Projekt My eRoads zugrunde (Jöhrens et al. 2023)

Tabelle 93: Reduktion der spezifischen CO₂-Emissionen bei Bussen im Trendszenario

Zeitraum	Nahlinienbusse Diesel & Erdgas	Fernlinien- und Reisebusse Diesel & Erdgas
2014-2022	-0,5 % p. a.	-0,5 % p. a.
2023-2028	-0,5 % p. a.	-0,5 % p. a.
2029-2033	-0,5 % p. a.	-0,5 % p. a.
2034-2050	-0,5 % p. a.	-0,5 % p. a.

Quelle: eigene Annahmen

4.3.3 Motorisierte Zweiräder und sonstige Fahrzeugkategorien

Für die motorisierten Zweiräder wird keine Effizienzverbesserung angenommen.

Für die leichten übrigen Kfz werden dieselben Verbesserungsdaten wie für LNF, für schwere übrige Kfz dieselben Verbesserungsdaten wie für Lkw angenommen.

4.3.4 Entwicklung der spezifischen Emissionen

Die Entwicklung der spezifischen Emissionen im Trendszenario ergibt sich aus den Emissionsfaktoren des HBEFA 4.2 und der geltenden Emissionsgesetzgebung für Straßenfahrzeuge. Ab dem Jahr 2023 neuzugelassene Pkw und leichte Nutzfahrzeuge entsprechen dem Emissionsstandard Euro 6-d, Busse und SNF der Norm Euro VI D-E.

Im November 2022 veröffentlichte die EU-Kommission einen Vorschlag für die Norm Euro 7, welche Pkw, LNF, Busse und SNF umfasst (EU 2022b). Dieser Vorschlag sah u.a. deutliche Reduktionen der Emissionsgrenzwerte, insb. bei SNF, sowie Überarbeitungen der Prüfverfahren zur weiteren Reduktion der Emissionen im Realbetrieb vor. Da zum Zeitpunkt der Aktualisierung die Verhandlungen um die Euro 7 Norm noch im Gange und die konkrete Ausgestaltung der Norm noch unklar waren, wird die Euro 7 Norm im Trendszenario der Version 6.53 noch nicht berücksichtigt. Dies sollte in zukünftigen Aktualisierungen und nach Möglichkeit aufbauend auf der nächsten HBEFA-Version (5.1, 2025 erwartet) umgesetzt werden.

4.4 Schienenverkehr

4.4.1 Betriebsleistung und Auslastung

Die Auslastungsgrade des Personenverkehrs der DB AG nahm bis 2019 zu. Nach dem pandemiebedingten Einbruch im Jahr 2020 stieg die Auslastung bis 2023 wieder deutlich an, blieb jedoch noch unter dem Niveau von 2019. Es wird angenommen, dass das Niveau von 2019 bis 2030 wieder nahezu erreicht wird. Bis 2040 wird eine weitere Zunahme von 3,6% angenommen, danach bleiben die Auslastungen konstant.

Beim Güterverkehr gibt es in einzelnen Jahren Schwankungen nach oben und unten. So lag der Wert 2022 höher als 2019. Im Szenario wird aufgrund der Änderungen der Güterstruktur in der Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2022 (weniger Massengüter, mehr Fertigwaren und Container) mit rückläufigen Auslastungsgraden gerechnet (BMDV 2021). Die Auslastungsgrade der DB AG wurden mangels eigener Daten auch für den Eisenbahnverkehr der NE-Bahnen übernommen.

Tabelle 94: Entwicklung der Auslastungsgrade im Güter-, Personenfern- und Personennahverkehr

Zuggattung	2019	2023	2025	2030	2040	2050	2019-2030	2030-2050
GV	57,3%	56,3%	56,2%	56,1%	55%	53%	-0,1%	-7,4%
PFV	56,3%	49,1%	51,0%	56,0%	58%	58%	-0,5%	+3,6%
PNV	28,1%	27,5%	28,0%	28,5%	29%	29%	-0,5%	+1,8%

Quelle: DB AG, Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2022“, eigene Annahmen

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 wird erwartet, dass auch auf nicht-elektrifizierten Strecken zukünftig andere Antriebsarten zum Zuge kommen. So werden in der Ausschreibung des Pfalznetzes ab 2025 Neufahrzeuge mit fast ausschließlich batterie-elektrischem Antrieb (BEMU) gefordert. Andere Antriebsformen wie Brennstoffzellen (HEMU) werden bereits eingesetzt.¹²

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 2.3.3). Andere Antriebsarten werden vorerst nicht berücksichtigt.

Die angenommenen Anteile der Dieseltraktion an den Betriebsleistungen sind in Tabelle 95 zusammengefasst.

Tabelle 95: Entwicklung des Dieselanteils an den Betriebsleistungen im Güter-, Personenfern- und Personennahverkehr

Bereich	2019	2023	2025	2030	2040	2050	2019-2030	2030-2050
GV DB	4,0%	6,2%	5,6%	4%	2%	0,5%	0%	-88%
PFV DB	1,6%	1,1%	1,1%	1,0%	0,8%	0,6%	-38%	-40%
PNV DB	13,0%	15,3%	13,2%	8%	5%	3%	-38%	-63%
GV NE	6,2%	5,5%	4,9%	4,2%	3,2%	2,2%	-32%	-48%
PNV NE	34%	29%	24%	12%	9%	6%	-64%	-49%

Quelle: DB AG, eigene Annahmen

4.4.2 Entwicklung der Energieeffizienz

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

Diese Annahmen werden für das Trendszenario wie folgt übernommen:

- Absenkung des spezifischen Energieverbrauchs je Platz-km bis 2050 um 0,5 % pro Jahr.

¹² <https://www.dw.com/de/der-erste-ohne-emissionen-brennstoffzellen-zug-startet/a-45516725>

- ▶ Im Güterverkehr: Minderung des spezifischen Energieverbrauchs je angebotenen Tonnenkilometer um 0,5 % pro Jahr.

4.4.3 Entwicklung der spezifischen Emissionen

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 die Einführung einer weiteren 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 NO_x/kg Kraftstoff und 0,08 g Partikel/kg Kraftstoff für die mittlere Flotte erreicht.
- ▶ Güterverkehr: Die Grenzwerte der Stufe V werden bis 2040 vollständig in der Flotte umgesetzt. Daraus ergeben sich bis 2040 Emissionswerte von 20 g NO_x/kg Kraftstoff und 0,12 g Partikel/kg Kraftstoff.
- ▶ 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 96: 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
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

Diese Annahmen wurden gegenüber der TREMOD-Version 6.23 nicht verändert.

4.5 Binnenschifffahrt

Die Annahmen für die Binnenschifffahrt im Trendszenario werden mit Ausnahme der Fahr- und Verkehrsleistungsentwicklung aus TREMOD 6.43 beibehalten. Der Vollständigkeit halber werden alle Annahmen im Folgenden aufgeführt.

4.5.1 Auslastung und zurückgelegte Schiffskilometer

Die Verkehrsleistungen der Binnenschifffahrt werden über die Größenklassenverteilung (Tragfähigkeitsklassen) der Schiffe und die mittlere Auslastung der Tragfähigkeit in die zurückgelegten Schiffskilometer umgerechnet. Die Annahmen aus (Heidt et al. 2016) zur Zunahme der mittleren Tragfähigkeit werden beibehalten. Die durchschnittliche Auslastung ändert sich hingegen nicht und orientiert sich an Werten vergangener Jahre (2010-2019). Für das Jahr 2022 war die mittlere Beladung pro Schiff mit 925 t aufgrund der niedrigen Wasserstände in den Sommermonaten niedriger als in den Vorjahren. Für das Jahr 2023 lagen noch keine Daten zur Auslastung vor. Wegen der gesunkenen Verkehrsleistung siehe Kap. 3.3 wird die Auslastung aus 2022 übernommen. In den Folgejahren wird angenommen, dass die mittlere Beladung wieder ähnlich zu den Vorjahren bei knapp unter 1.200 t liegt und bis zum Jahr 2030 auf 1.270 t ansteigt.

4.5.2 Entwicklung der Energieeffizienz

Die Annahmen für die Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs wurden ebenfalls aus (Heidt et al. 2016) übernommen. Aus einer Kombination aus technischen und betrieblichen Verbesserungsmaßnahmen ergibt sich im Trendszenario eine durchschnittliche Reduktion des Energieverbrauchs pro Tonnenkilometer von ca. 1% p.a. Es wird angenommen, dass diese Maßnahmen ohne politische Vorgaben umgesetzt werden, da derzeit noch keine Regulierungen zur Energieeffizienz der Binnenschifffahrt existieren.

Als Kraftstoff wird für Binnenschiffe in TREMOD neben Diesel bisher nur LNG betrachtet, dessen Anteil am gesamten Energieverbrauch der Binnenschifffahrt von 0,1 % im Jahr 2020 auf 0,6 % im Jahr 2030 ansteigt und anschließend konstant bleibt. Der Einsatz anderer alternative Antriebe, z. B. BEV, FCEV, oder synthetischer Kraftstoffe wird für Binnenschiffe in TREMOD bisher nicht berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die existierenden Maßnahmen, z.B. das Förderprogramm zur nachhaltigen Modernisierung der Binnenschifffahrt (BMVI 2021), unter den geltenden Rahmenbedingungen keine nennenswerten Anreize zur Marktdurchdringung mit alternativen Antrieben setzen.

Alle weiteren Annahmen zur Flottenstruktur, z. B. zu Schiffs-, Ladungsarten und Tragfähigkeitsklassen werden aus (Heidt et al. 2016) beibehalten.

4.5.3 Entwicklung der spezifischen Emissionen

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.

Folgende Maßnahmen sind für Binnenschiffe von Relevanz:

- ▶ Die Emissionsgesetzgebung für Binnenschiffsmotoren (Verordnung 2016/628) wird über die Altersverteilung der Binnenschiffsmotoren in TREMOD berücksichtigt. Diese betrifft für das Trendszenario insbesondere die ab dem Jahr 2019 eingeführte Abgasstufe V. Aufgrund der geltenden Übergangsfristen für das Inverkehrbringen von Motoren und deren durch die COVID 19 bedingte Verlängerung wird angenommen, dass erst ab dem Jahr 2022 ausschließlich Stufe V-Motoren neu in Verkehr gebracht werden.
- ▶ Das Programm zur Förderung zur Modernisierung von Binnenschiffen des BMDV wurde bis 2021 verlängert wurde und stellt Zuschüsse zur Anschaffung moderner Binnenschiffsantriebe zur Verfügung. Jedoch ist laut Einschätzung des VDMA, siehe in (Heidt et al. 2016), unklar ob die Modernisierungsrate der Motoren mit dem Inkrafttreten der Stufe V kurzfristig

abnimmt. Die Einbaurate neuer Motoren wird daher in TREMOD auf einem etwas geringeren Niveau als in den letzten Jahren, in welchen das Förderprogramm schon bestand, fortgeführt.

Durch die getroffenen Annahmen zur Flottenerneuerung und Einführung der Stufe V gehen die spezifischen Emissionen zukünftig weiter zurück (Tabelle 97).

Tabelle 97: Mittlere Emissionsfaktoren der Binnenschifffahrt (in g/kg Dieselkraftstoff) im Trendszenario

Komponente	2025	2030	2035	2040	2050
CO	8,3	7,5	6,8	6,2	5,6
HC	2,4	2,2	1,9	1,7	1,6
NO _x	43,1	35,6	28,5	23,0	17,4
PM	0,9	0,7	0,5	0,4	0,2

Quelle: (Heidt et al. 2016; Knörr et al. 2013, 2020); eigene Berechnungen

4.6 Flugverkehr

4.6.1 Entwicklungen der Verkehrsleistung und Flugzeugkilometer

Im Gegensatz zu den anderen Verkehrsträgern können beim Flugverkehr die Verkehrsleistungen nicht aus der „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2022“ übernommen werden, da hier unterschiedliche Bilanzgrenzen Anwendung finden.

Für das Jahr 2023 liegen bereits die Daten (Verkehrsleistungen und Flugzeugkilometer) des gewerblichen Flugverkehrs auf den Hauptverkehrsflughäfen (HVF) vor. Für den sonstigen Flugverkehr werden die Verkehrsmengen aus dem Vorjahr übernommen.

Für das Jahr 2024 wird beim internationalen Flugverkehr angenommen, dass dieselben Verkehrsmengen wie im Jahr 2019 vorliegen. Beim nationalen Flugverkehr wird im Jahr 2024 trotz weiterem Anstieg nicht das Niveau von 2019 erreicht wird.

Nach 2024 wird angenommen, dass die Anzahl Starts der nationalen Flüge leicht sinkt. Dies wurde aus dem Trend im Zeitraum 2000-2019 abgeleitet. Der Trend dieses Zeitraums wird ebenfalls für die internationalen Flüge verwendet, um eine Fortschreibung durchzuführen. Die Anzahl internationaler Flüge steigt. Demnach sinkt die Gesamtanzahl an Starts jährlich um ca. 0,6 %.

Folgende Tabelle zeigt die Anzahl Starts (gewerblich und nicht-gewerblich). Für die Gesamtemissionen sind die gewerblichen Flüge von den Hauptverkehrsflughäfen maßgeblich. Zwar weisen die gewerblichen Flüge von den sonstigen Flugplätzen und insbesondere der nicht-gewerbliche Flugverkehr eine hohe Anzahl an Starts auf, jedoch sind zum einen die Flugdistanzen im Schnitt deutlich kürzer und zum anderen werden kleinere Flugzeuge (z. B. Propellermaschinen zwischen den Ostfriesischen Inseln) eingesetzt.

Tabelle 98: Anzahl Starts

Jahr	National	International
2019	1,72 Mio.	0,90 Mio.

Jahr	National	International
2020	1,46 Mio.	0,40 Mio.
2021	1,52 Mio.	0,50 Mio.
2022	1,56 Mio.	0,72 Mio.
2023	1,51 Mio.	0,77 Mio.
2030	1,62 Mio.	0,91 Mio.
2040	1,47 Mio.	0,92 Mio.
2050	1,32 Mio.	0,94 Mio.

Quellen: bis 2022 nach TREMOD, HVF 2023 nach Destatis, sonstiger Flugverkehr 2023 gleich 2022 gesetzt; danach Annahmen Trendszenario. Anmerkung: Tabelle enthält den gewerblichen sowie nicht-gewerblichen Flugverkehr

Für das Szenario werden neben der Anzahl Starts das Aufkommen pro Start (Passagiere und Fracht) sowie die durchschnittliche Flugdistanz aus dem Trend 2000-2019 abgeleitet. Die folgende Tabelle zeigt die Änderungen ggü. dem Jahr 2019.

Tabelle 99: Änderungen des Aufkommens und der mittleren Flugweite pro Flug ggü. 2019

Jahr	National			International		
	Flugweite	Fracht	Passagiere	Flugweite	Fracht	Passagiere
2019	-	-	-	-	-	-
2020	-9 %	+23%	-63%	+3%	+98%	-45%
2021	-46 %	+118%	-54%	-6%	+110%	-41%
2022	-42 %	+93%	-22%	-3%	+40%	-11%
2023	-41 %	+7 %	-5%	-1%	+19%	0%
2024	0 %	0%	0%	0%	0%	0%
2030	+0 %	+2 %	+3%	+1%	-4%	+8%
2040	+1 %	+3 %	+3%	+2%	-12%	+20%
2050	+2 %	+3 %	+9%	+3%	-20%	+32%

Quellen: bis 2022 nach TREMOD, HVF 2023 nach Destatis, sonstiger Flugverkehr 2023 gleich 2022 gesetzt; danach Annahmen Trendszenario.

Zu erkennen ist, dass die durchschnittliche Flugweite beim nationalen Flugverkehr in den Jahren 2021 und 2023 deutlich gesunken ist. Hintergrund ist, dass der gewerbliche Flugverkehr mit hohen Flugweiten reduziert wurde, wogegen beim nicht-gewerblichen Flugverkehr nur geringe Reduktionen zu beobachten waren. Im Szenario wird von einem leichten Anstieg ausgegangen, da auf kürzeren Distanzen vermehrt andere Verkehrsmittel (z. B. Bahn) eingesetzt werden. Die Passagierzahl pro Flug nahm aufgrund der Coronapandemie bis 2020-2022 beim nationalen Flugverkehr deutlich ab. Diese erholten sich wieder im Jahr 2023. Es wird angenommen, dass nach 2024 die Passagierzahl pro Flug steigt. Ebenfalls wird ein leichter Anstieg bei den transportierten Gütern pro Flug im nationalen Verkehr angenommen.

Dieselben Tendenzen während der Jahre 2020-2022 konnten beim internationalen Flugverkehr beobachtet werden, jedoch in unterschiedlicher Ausprägung. Im Jahr 2023 konnten fast wieder die Flugweiten und Besetzungsgrade von 2019 beobachtet werden. Nach 2024 wird beim internationalen Flugverkehr von einem leichten Anstieg der Flugdistanzen ausgegangen. Pro Flug reduziert sich leicht die transportierte Fracht, wogegen die Passagierzahl steigt. Dies entspricht dem Trend der vergangenen Jahre.

Aus den Angaben ergibt sich die Entwicklung der Verkehrsleistungen aus der folgenden Tabelle. Verglichen zu 2024 nimmt die Verkehrsleistung im nationalen Personenverkehr bis 2050 um 16 % ab, wogegen angenommen wird, dass beim internationalen Verkehr ein Anstieg von 42 % erfolgt. Beim Güterverkehr wird ein Rückgang von 20 % und 15 % für nationale bzw. internationale Flüge angenommen. Durch den Einsatz größerer Flugzeuge bzw. höheren Auslastungen unterscheiden sich die Änderungen der Flug-km von den Änderungen der Verkehrsleistung. Beim nationalen Verkehr kommt es zu einem Rückgang von 23 % und bei internationalen Flügen zu einem Anstieg von 8 % bis 2050.

Tabelle 100: Verkehrsleistungen (Personen und Güter) des gesamten Flugverkehrs im Szenario

Jahr	National			International		
	PV [Pkm]	GV [tkm]	Flug-km	PV [Pkm]	GV [tkm]	Flug-km
2019	10,6 Mrd.	50 Mio.	421 Mio.	252,1 Mrd.	12.162 Mio.	1.666 Mio.
2020	3,1 Mrd.	47 Mio.	326 Mio.	63,9 Mrd.	11.043 Mio.	764 Mio.
2021	2,3 Mrd.	51 Mio.	200 Mio.	76,9 Mrd.	13.301 Mio.	867 Mio.
2022	4,3 Mrd.	50 Mio.	219 Mio.	172,7 Mrd.	13.123 Mio.	1.285 Mio.
2023	5,2 Mrd.	45 Mio.	216 Mio.	213,4 Mrd.	12.256 Mio.	1.412 Mio.
2024	7,9 Mrd.	50 Mio.	315 Mio.	252,1 Mrd.	12.162 Mio.	1.667 Mio.
2030	10,3 Mrd.	48 Mio.	399 Mio.	276,8 Mrd.	11.894 Mio.	1.699 Mio.
2040	9,7 Mrd.	44 Mio.	364 Mio.	317,8 Mrd.	11.257 Mio.	1.745 Mio.
2050	8,9 Mrd.	40 Mio.	328 Mio.	359,0 Mrd.	10.444 Mio.	1.794 Mio.

Quellen: bis 2022 nach TREMOD, HVF 2023 nach Destatis, sonstiger Flugverkehr 2023 gleich 2022 gesetzt; danach Annahmen Trendszenario.

4.6.2 Entwicklungen der spezifischen Emissionen

Bezüglich der Kraftstoffverbräuche und somit auch der kraftstoffspezifischen Emissionen (u. a. CO₂) wird eine Verbesserung von 1 % p. a. bezogen auf die Verkehrsleistung angenommen. Die ICAO gibt eine Bandbreite von 0,9 bis 1,2 % p. a. bezogen auf die Verkehrsleistung durch Verbesserungen im Betrieb und Fortschritte bei der Antriebstechnologie und Konstruktion (Fleming et al. 2022).

Bei den NO_x-Emissionen werden Verbesserungen pro Flugzeug-km in Höhe von 2,0 % p. a. und bei den PM-Emissionen 1,1 % p. a. angenommen (Fleming et al. 2022). Für die sonstigen Schadstoffemissionen liegen keine Zielwerte vor, sodass hier vereinfachend die Verbesserungen beim Kraftstoffverbrauch übernommen werden.

4.7 Ergebnisse

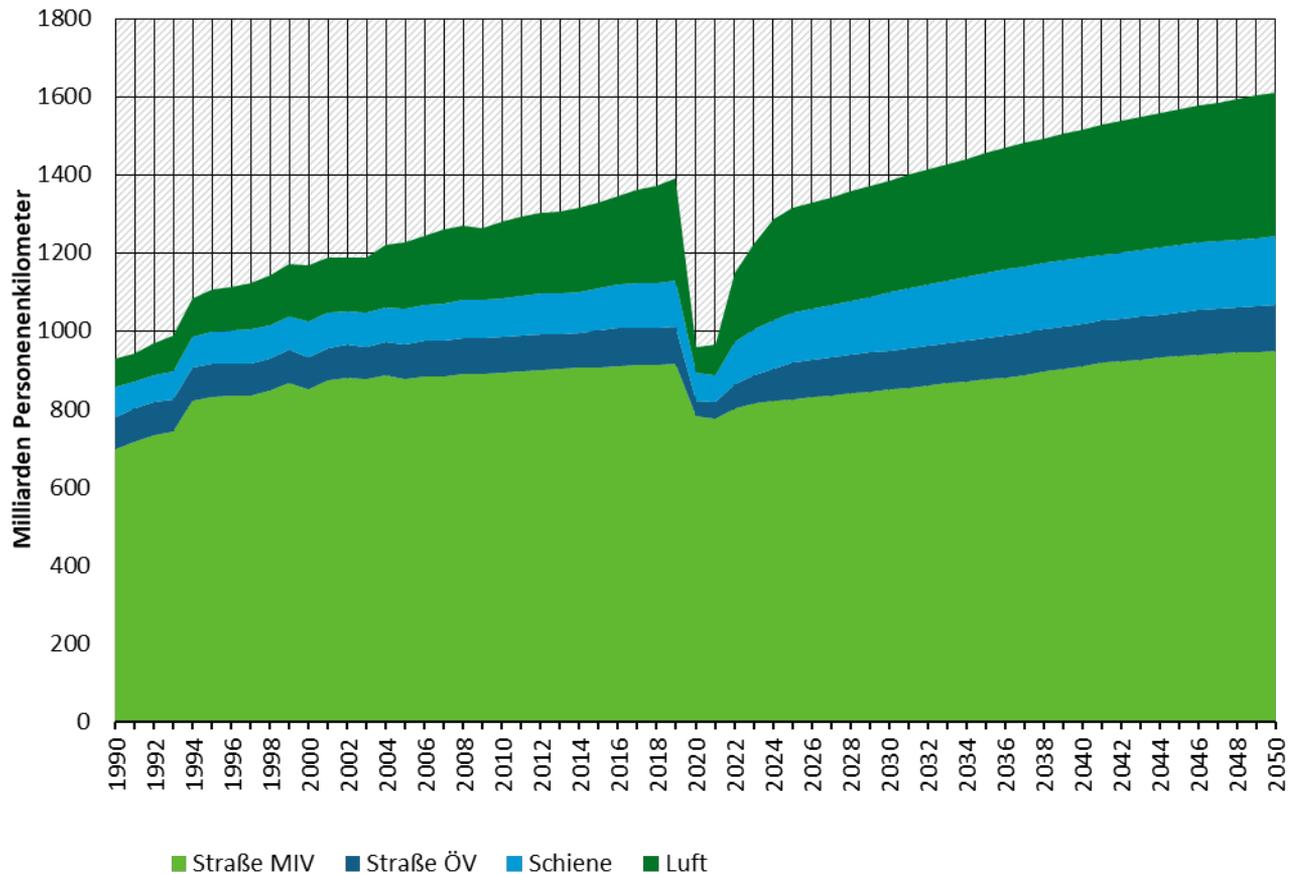
In diesem Kapitel werden ausgewählte Ergebnisse des Verkehrs in Deutschland im Trendszenario dargestellt. Schwerpunkt sind die Ergebnisse für den Inlandsverkehr, wie sie mit TREMOD berechnet wurden. Eine Sonderstellung hat hierbei der Luftverkehr, welcher alle von Deutschland abgehenden und damit auch internationale Flüge beinhaltet. Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen wird außerdem in der Abgrenzung des Bundesklimaschutzgesetzes (KSG) gezeigt. Damit kann ein Vergleich der Ergebnisse mit den Zielen des KSG gezogen werden.

Die Ergebnisse für die Verkehrs- und Fahrleistungen werden ab 1990, Energieverbrauch und Emissionen ab 2020 dargestellt (Ergebnisse der Vorjahre siehe Kapitel 2.7.1). Alle Ergebnisse bis 2022 beruhen auf Realdaten (siehe Kapitel 2), die Ergebnisse für 2023 sind vorläufige Werte, die für die Emissionsbilanz nach Bundesklimaschutzgesetz zum 15.03.2024 erstellt wurden und so als Startjahr im Trendszenario verwendet werden können. Relative Entwicklungen werden auf das letzte Realjahr (2022) oder das letzte Jahr vor der Pandemie (2019) bezogen.

4.7.1 Verkehrs- und Fahrleistungen

Die Verkehrsleistungen des Personenverkehrs sind in Abbildung 20 in der Zeitreihe 1990 bis 2050 dargestellt. Sie steigen in der „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2022“ des BMDV und gemäß den eigenen Analysen für den Flugverkehr (siehe Kapitel 4.6.1) nach dem Einbruch in der Pandemie 2020 bis 2036 wieder an. Besonders auffällig ist der geringe Anstieg beim MIV, der im Jahr 2036 mit 880 Mrd. Pkm noch 4 % unter dem Niveau des Vorpandemiejahrs 2019 liegt. Der öffentliche Verkehr mit Bussen und Bahnen nimmt weiter zu. Insbesondere der Schienenverkehr steigt bis 2050 noch deutlich an, gefolgt vom Flugverkehr. 2050 ist die Verkehrsleistung des Schienenverkehrs um 50 % über dem Niveau von 2019 (Flugverkehr: 40%, Busverkehr: 24 %, MIV: 3,4%).

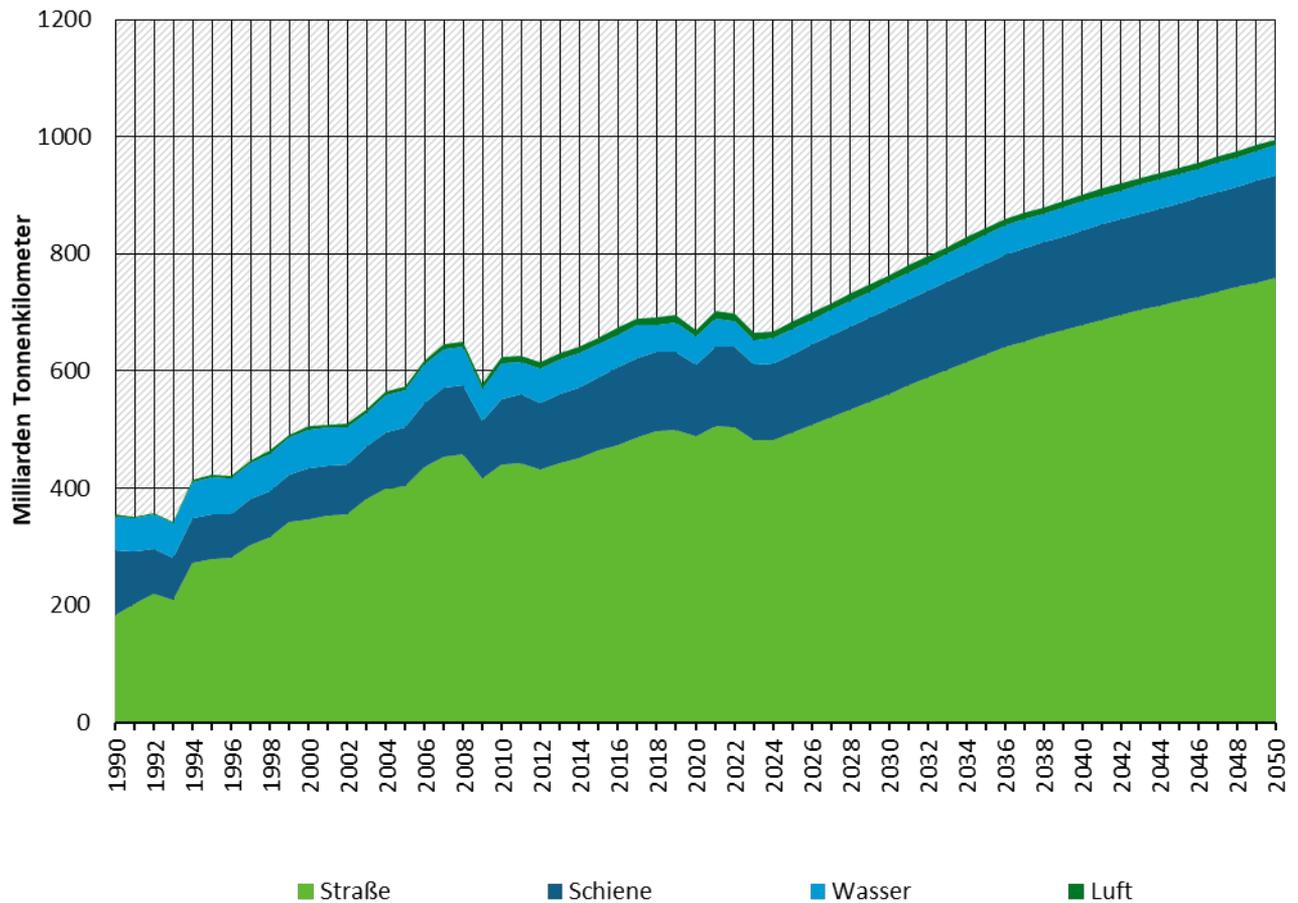
Abbildung 20: Verkehrsleistungen des Personenverkehrs in Deutschland nach Verkehrsträgern von 1990 bis 2022 und im Trendszenario bis 2050



Anmerkungen: Verkehrsleistungen im Inland für Straße (Straßenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw und Bussen auf inländischem Territorium), Schiene (Eisenbahn, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen auf inländischem Territorium) und Luft (von Deutschland abgehender Flugverkehr bis zur ersten Zwischenlandung); bis 2022 real, 2023 vorläufig, ab 2024 Szenario. Quelle: BMDV, Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2022; eigene Berechnungen in TREMOD 6.53 vom 30.04.2024.

Die Verkehrsleistungen des Güterverkehrs sind in Abbildung 21 in der Zeitreihe 1990 bis 2050 dargestellt. Sie steigen in der „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2022“ des BMDV dem langjährigen Trend der Vergangenheit folgend weiter an. Ausgenommen ist die nach eigenen Analysen abgeleiteten Verkehrsleistung des Flugverkehrs (siehe Kapitel 3.6.1). Die Pandemie im Jahr 2020 hat sich kaum auf die Entwicklung ausgewirkt. Der Straßenverkehr nimmt weiterhin am stärksten zu, gefolgt von der Eisenbahn. Dagegen stagniert die Binnenschifffahrt und der Flugverkehr geht zurück. 2050 ist die Verkehrsleistung des Straßenverkehrs um 52 % über dem Niveau von 2019 (Eisenbahn: 31%, Binnenschifffahrt: 1 %, Flugverkehr: -14 %).

Abbildung 21: Verkehrsleistungen des Güterverkehrs in Deutschland nach Verkehrsträgern von 1990 bis 2022 und im Trendszenario bis 2050

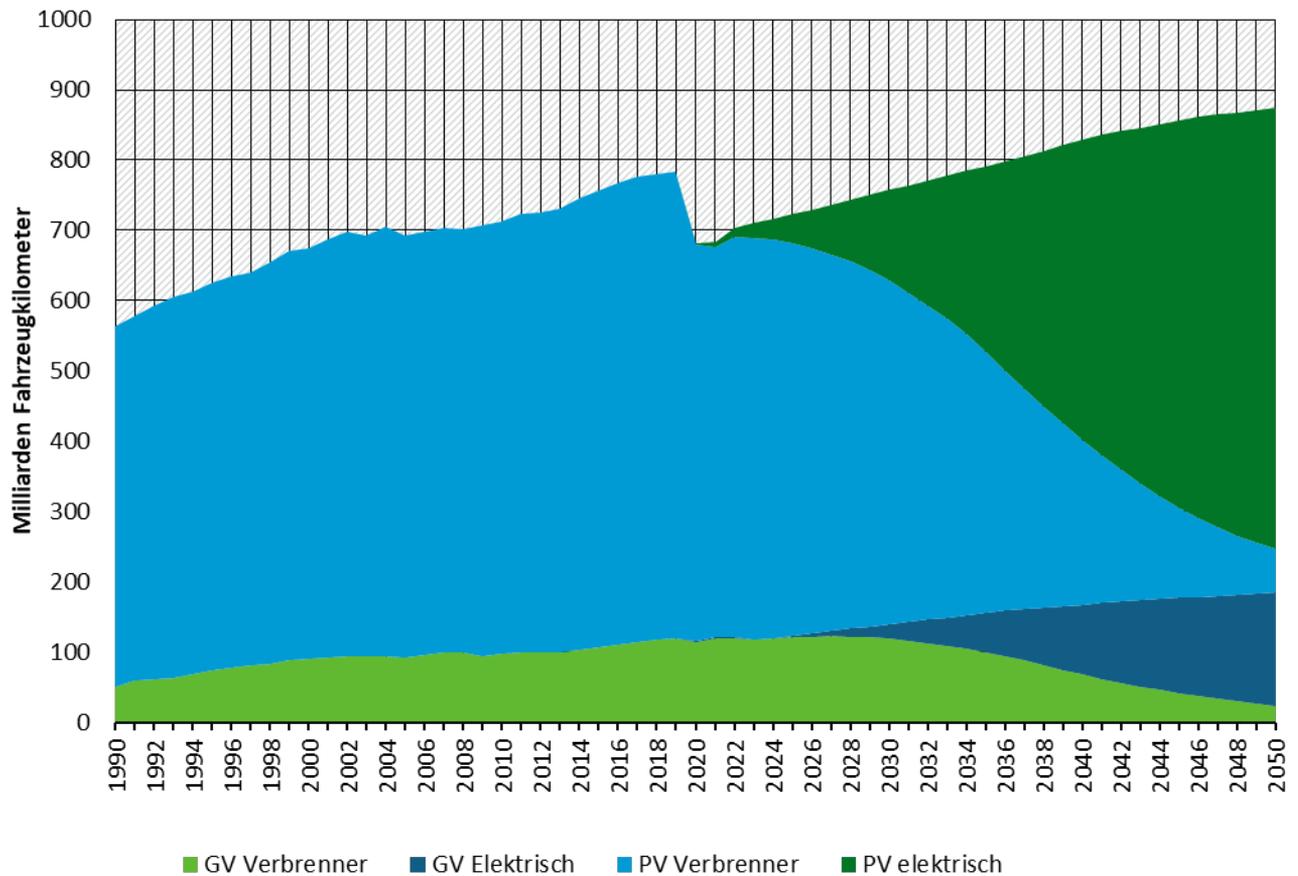


Anmerkungen: Verkehrsleistungen im Inland für Straße (Straßenverkehr mit leichten und schweren Nutzfahrzeugen auf inländischem Territorium), Schiene (Eisenbahn auf inländischem Territorium), Wasser (Güterverkehr mit Binnenschiffen auf inländischem Territorium) und Luft (von Deutschland abgehender Flugverkehr bis zur ersten Zwischenlandung), bis 2022 real, 2023 vorläufig, ab 2024 Szenario. Quelle: Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2022, TREMOD 6.53 vom 30.04.2024.

Die Fahrleistungen des Straßenverkehrs sind in Abbildung 22 in der Zeitreihe 1990 bis 2050 dargestellt. Die Fahrleistungsentwicklung im Straßenpersonenverkehr folgt im Wesentlichen der Verkehrsleistungsentwicklung. Bis 2050 liegt die Zunahme gegenüber 2019 bei 3,6 %. Beim Güterverkehr steigen die Fahrleistungen im gleichen Zeitraum um 55 % an. Diese Erhöhung liegt über der Zunahme der Verkehrsleistung und wird verursacht durch den überproportionalen Anstieg der Fahrleistungen der leichten Nutzfahrzeuge (+76 %).

Die Elektrifizierung des Straßenverkehrs wird nach 2021 deutlich sichtbar. Der Personenverkehr hat den elektrischen Fahrleistungsanteil von 2,1 % im Jahr 2022 erreicht, beim Güterverkehr waren es 0,5 %. Die 10 %-Marke überschreitet der Personenverkehr im Trendszenario im Jahr 2027, der Güterverkehr im Jahr 2029. 50 % werden im Jahr 2037 (PV) bzw. 2038 (GV) erreicht. Im Jahr 2050 liegt der Anteil im Personenverkehr bei 91 %, im Güterverkehr bei 87 %.

Abbildung 22: Fahrleistungen des Straßenverkehrs in Deutschland nach Verkehrsarten und Antrieben von 1990 bis 2022 und im Trendszenario bis 2050



Anmerkungen: Fahrleistungen im Inland; PV: motorisierten Zweiräder, Pkw und Busse; GV: leichte und schwere Nutzfahrzeuge auf inländischem Territorium, bis 2022 real, 2023 vorläufig, ab 2024 Szenario. Quelle: TREMOD 6.53 vom 30.04.2024.

4.7.2 Energieverbrauch und Emissionen

4.7.2.1 Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs nach Energieträgern

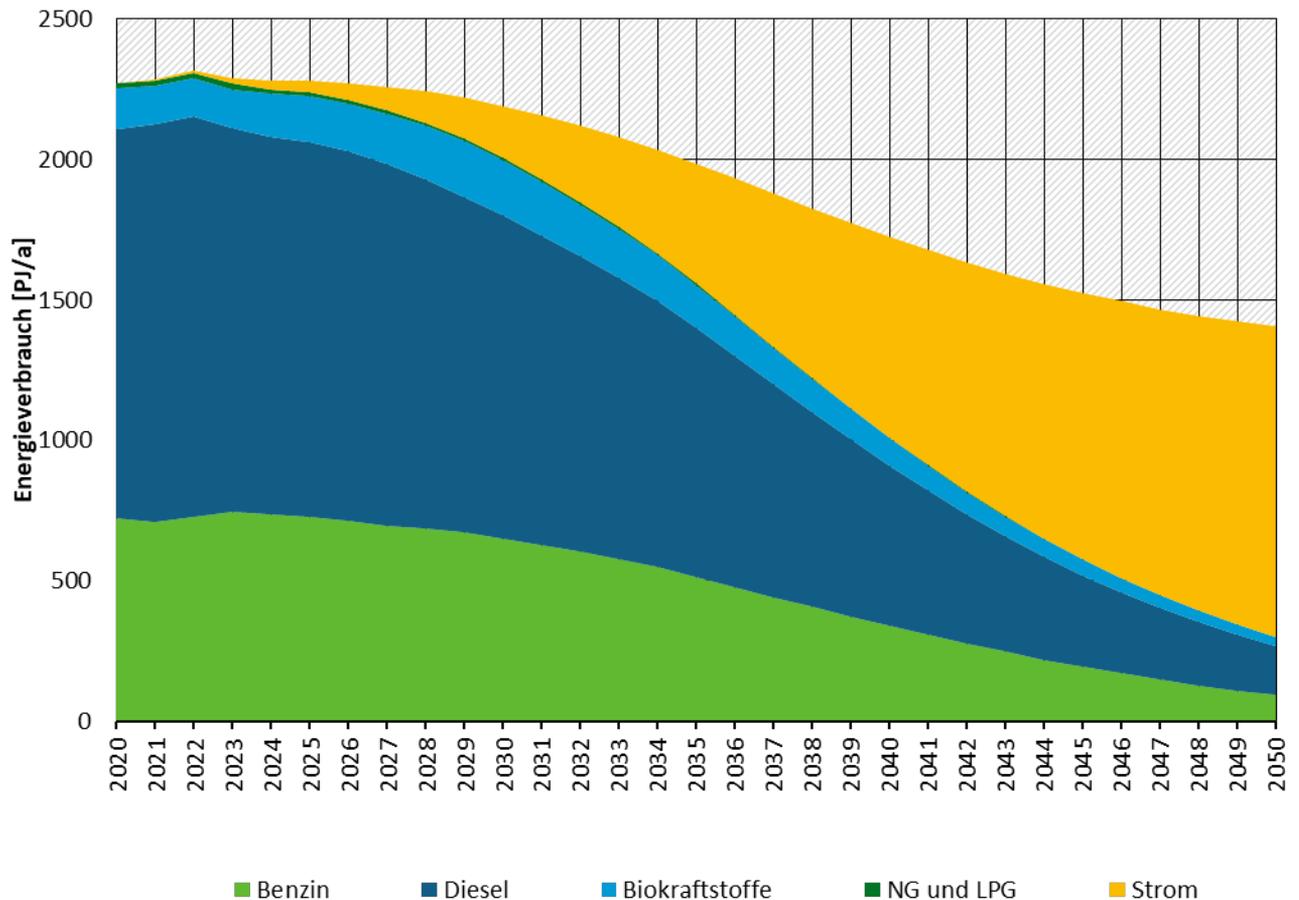
Abbildung 23 zeigt die Entwicklung des Energieverbrauchs des Straßenverkehrs in Deutschland auf inländischem Territorium unterschieden nach den Energieträgern Benzin (ohne Beimischung Bioethanol), Diesel (ohne Beimischung Biodiesel), Biokraftstoffe (Biodiesel, Bioethanol und Biogas), Erdgas (NG) und Flüssiggas (LPG) sowie Strom (Kraftfahrzeuge ohne Pedelecs). Danach zeigen sich bei den Energieträgern folgende Entwicklungen:

- ▶ Im Jahr 2021 dominierte der Verbrauch von Diesel, gefolgt von Benzin. Durch die zunehmende Zulassung von elektrischen Fahrzeugen geht der Verbrauch von Benzin und Diesel nach 2022 zurück und liegt im Jahr 2030 um 17 % unter dem Niveau von 2022. Bis 2050 liegt der Rückgang bei 88 %.
- ▶ Der Anteil der Biokraftstoffe nimmt kurzfristig noch auf 9 % im Jahr 2030 zu und nimmt nach 2030 langsam ab.
- ▶ NG und LPG haben über die gesamte Zeitreihe nur geringe Anteile am Energieverbrauch.

- Der Stromverbrauch im Straßenverkehr nimmt deutlich zu. 2030 liegt der Anteil des Stromverbrauchs am Gesamtverbrauch bei über 8 %, 2050 sind es 79 %.

Insgesamt nimmt der Energieverbrauch des Straßenverkehrs ab 2026 ab und liegt 2030 um knapp 6 % und 2050 um 39 % unter dem Wert von 2022.

Abbildung 23: Energieverbrauch des Straßenverkehrs in Deutschland nach Energieträgern - Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Trendszenario bis 2050



Anmerkungen: Endenergieverbrauch im Inland, bis 2022 real, 2023 vorläufig, ab 2024 Szenario.

Quelle: TREMOD 6.53 vom 30.04.2024.

4.7.2.2 Endenergieverbrauch aller Verkehrsträger

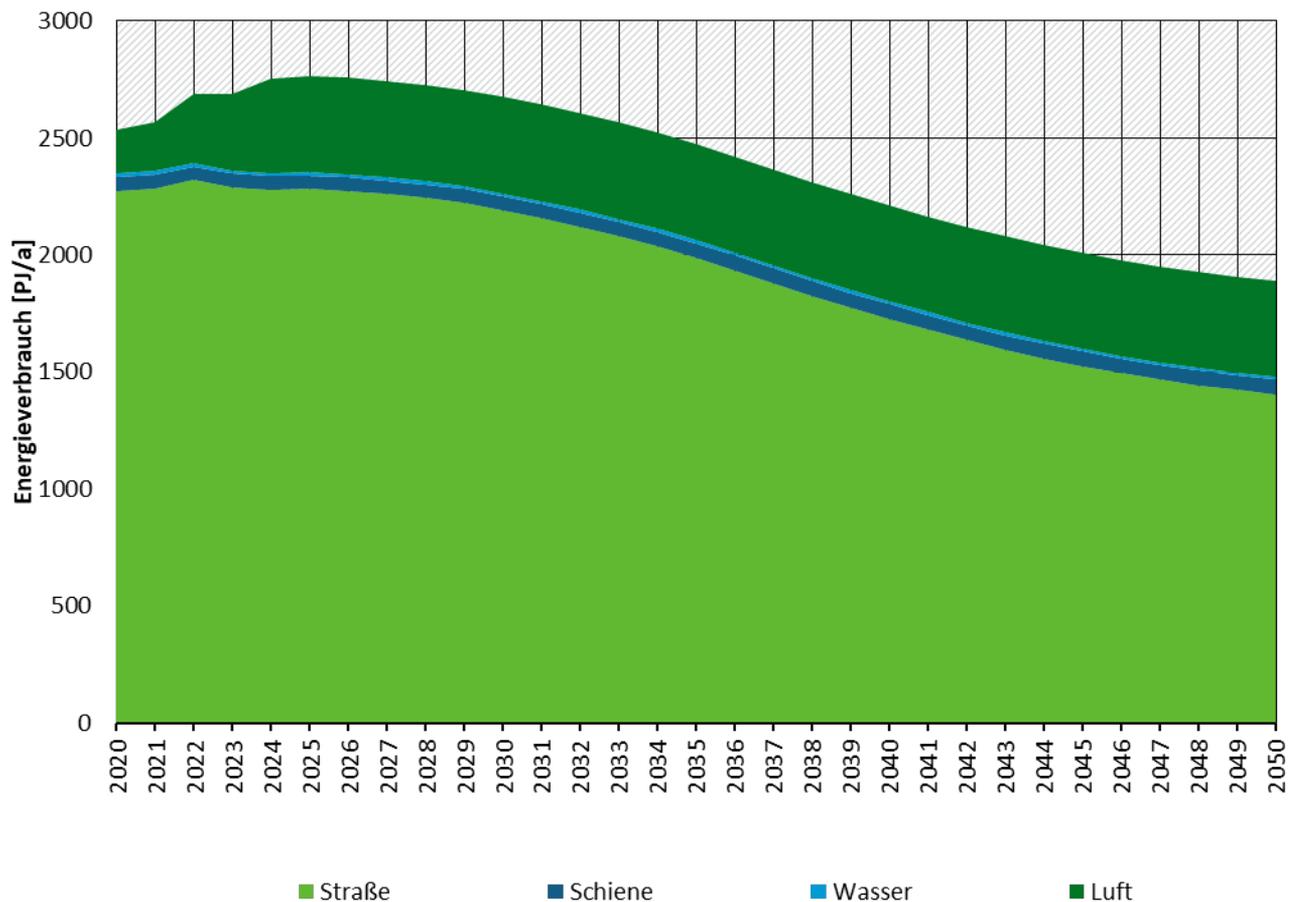
Abbildung 24 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Verkehrs in Deutschland von 2020 bis 2050 für die Verkehrsträger Straße (Straßenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen sowie Bussen auf inländischem Territorium), Schiene (Eisenbahn, Straßen-, Stadt- 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 (86 % im Jahr 2022 bis 74 % im Jahr 2050), gefolgt vom Flugverkehr. Der Energieverbrauch des Straßenverkehrs nimmt von 2022 bis 2030 um knapp 6 % bzw. bis 2050 um 39 % ab.

- ▶ Der Energieverbrauch des Flugverkehrs steigt von 2022 bis 2024 um 40 % und bleibt danach nahezu konstant.
- ▶ Bei der Bahn ist der Energieverbrauch über die gesamte Zeitreihe nahezu gleich.
- ▶ Bei der Binnenschifffahrt geht der Energieverbrauch von 2022 bis 2050 um 26 % zurück.

Der Energieverbrauch nimmt insgesamt für alle betrachteten Verkehrsträger von 2022 bis 2025 noch um knapp 3 % zu und danach ab. 2050 liegt der Verbrauch um 30 % unter dem Wert von 2022.

Abbildung 24: Energieverbrauch des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Trendszenario bis 2050



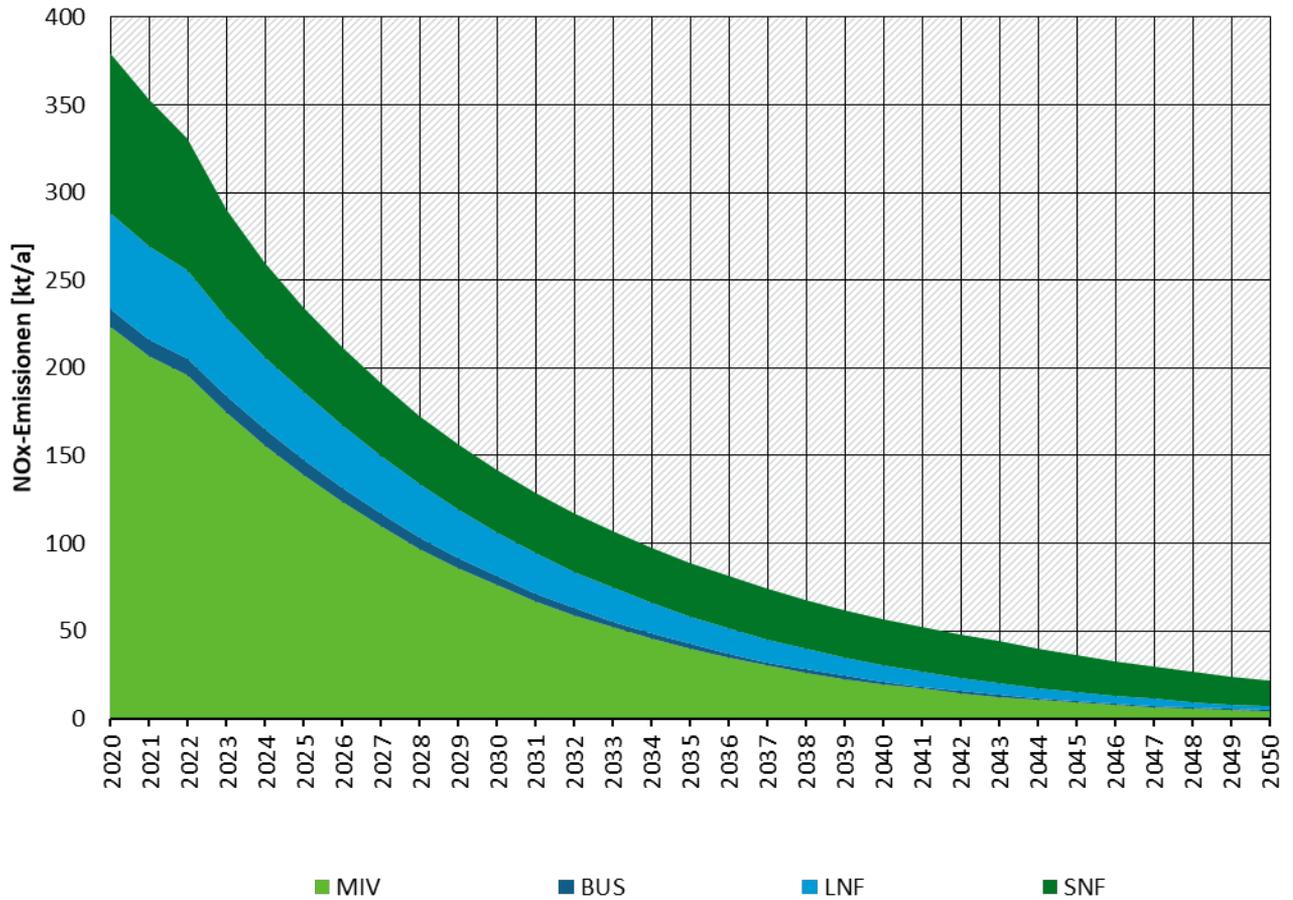
Anmerkungen: Endenergieverbrauch im Inland für Straße (Straßenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen sowie Bussen auf inländischem Territorium), Schiene (Eisenbahn, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen auf inländischem Territorium), Wasser (Güterverkehr mit Binnenschiffen auf inländischem Territorium) und Luft (von Deutschland abgehender Flugverkehr bis zur ersten Zwischenlandung); bis 2022 real, 2023 vorläufig, ab 2024 Szenario. Quelle: TREMOD 6.53 vom 30.04.2024.

4.7.2.3 Direkte Abgasemissionen des Straßenverkehrs

Abbildung 25 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). Insgesamt nehmen die Stickstoffoxidemissionen von 2022 bis

2030 um 57 % und bis 2050 um 94 % ab. Den stärksten Rückgang hat der MIV (-98 % bis 2050), gefolgt von den LNF (-96 %) und Bussen (-95 %). Die SNF erreichen einen Rückgang von -81 %.

Abbildung 25: Stickstoffoxidemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen im Trendszenario bis 2050

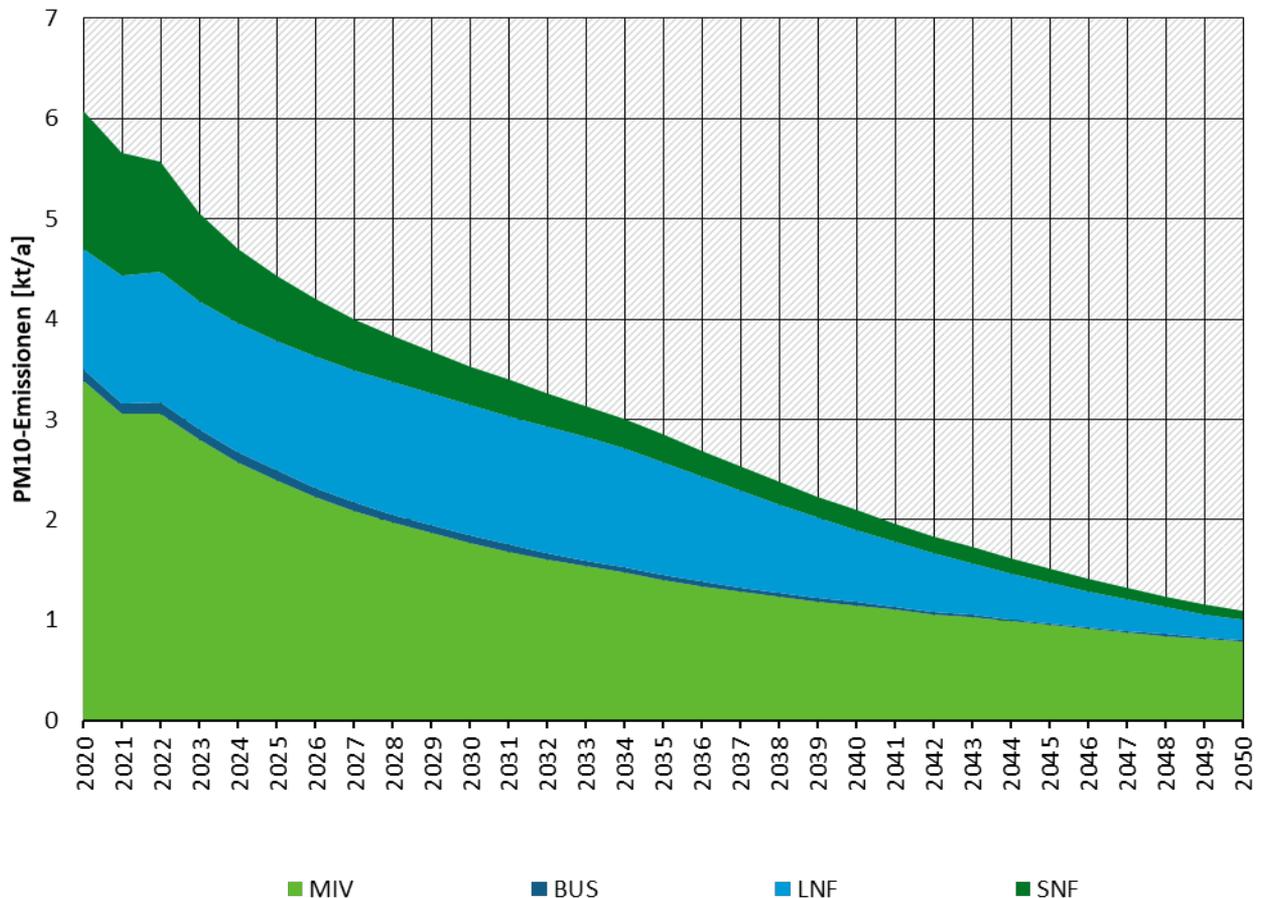


Anmerkungen: Direkte Abgasemissionen im Inland;; bis 2022 real, 2023 vorläufig, ab 2024 Szenario.

Quelle: TREMOD 6.53 vom 30.04.2024.

Abbildung 26 zeigt die Entwicklung der Abgaspartikelemissionen. Diese gehen bis 2050 gegenüber 2022 insgesamt um 80 % zurück.

Abbildung 26: Abgaspartikelemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen im Trendszenario bis 2050



Anmerkungen: Direkte Abgasemissionen im Inland; bis 2022 real, 2023 vorläufig, ab 2024 Szenario.
Quelle: TREMOD 6.53 vom 30.04.2024.

4.7.2.4 Treibhausgasemissionen des Verkehrs nach Territorialprinzip

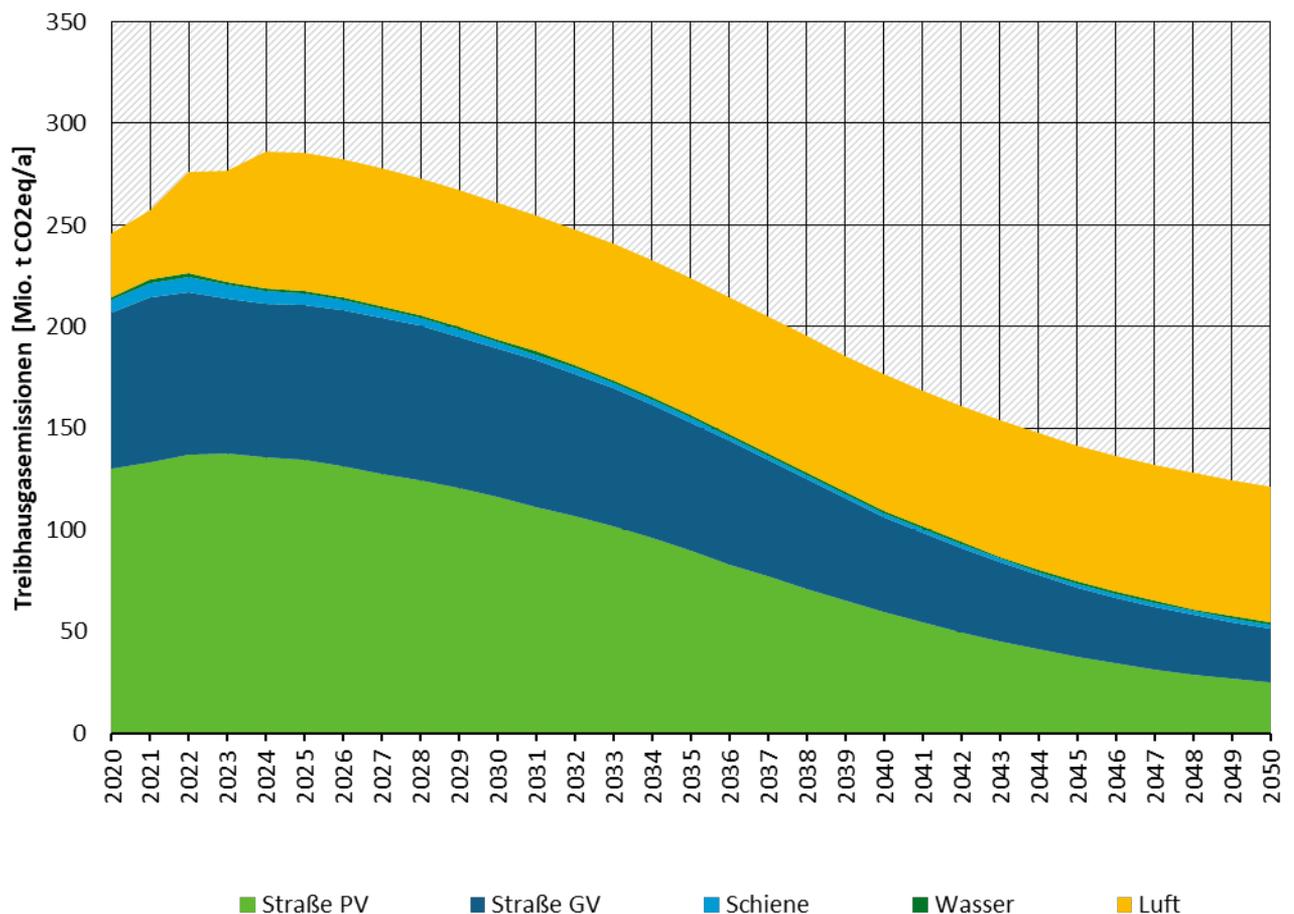
Abbildung 27 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland von 2020 bis 2050 einschließlich der Emissionen für die Bereitstellung der Energieträger für die Verkehrsträger Straße PV (Straßenpersonenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw und Bussen auf inländischem Territorium), Straße GV (Straßengüterverkehr mit leichten und schweren Nutzfahrzeugen auf inländischem Territorium), Schiene (Eisenbahn, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen), Wasser (Güterverkehr mit Binnenschiffen) 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 (79 % im Jahr 2022 bis 42 % Anteil im Jahr 2050), gefolgt zunächst vom Flugverkehr, der nach 2046 der dominante THG-Emittent wird. Die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs gehen von 2022 bis 2030 um 13 % und bis 2050 um 76 % zurück. Der größte Rückgang ist beim Personenverkehr (MIV und Bus) festzustellen (-82 %). Beim Güterverkehr (LNF+SNF) liegt der Rückgang nur bei 67 %. Die THG-Emissionen des Straßengüterverkehrs wären dann im Jahr 2050 um 8 % höher als im Personenverkehr (2022 noch 42 % weniger).

- ▶ Der Flugverkehr nimmt bis 2025 noch deutlich zu (+37 %) und verharrt danach auf diesem Niveau.
- ▶ Bei der Bahn gehen die Treibhausgasemissionen von 2022 bis 2030 um 57 % und bis 2050 um 77 % zurück.
- ▶ Bei der Binnenschifffahrt gehen die Treibhausgasemissionen von 2022 bis 2030 um 20 % und bis 2050 um 26 % zurück.

Die Treibhausgasemissionen gehen insgesamt für alle betrachteten Verkehrsträger von 2022 bis 2030 nur um 5 % und bis 2050 um 56 % zurück.

Abbildung 27: Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung der Gesamtemissionen im Trendszenario 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 2022 real, 2023 vorläufig, ab 2024 Szenario.

Quelle: TREMOD 6.53 vom 30.04.2024.

4.7.2.5 Treibhausgasemissionen des Verkehrs nach Bundesklimaschutzgesetz (KSG)

Im Rahmen des Bundesklimaschutzgesetzes werden, wie bei den internationalen Berichtspflichten (siehe Kapitel 2.7.1.5), die Treibhausgasemissionen des Verkehrs ermittelt. Der Unterschied

besteht darin, dass beim KSG die Emissionen von Gasturbinen in Erdgasverdichterstationen des Transportnetzes nicht im Bereich „Verkehr“ erfasst werden. Diese Abgrenzung wurde hier gewählt, da das Trendszenario auf der im März 2024 aktualisierten Treibhausgasbilanz bis zum Jahr 2023 (Umweltbundesamt 2024b) aufsetzt.

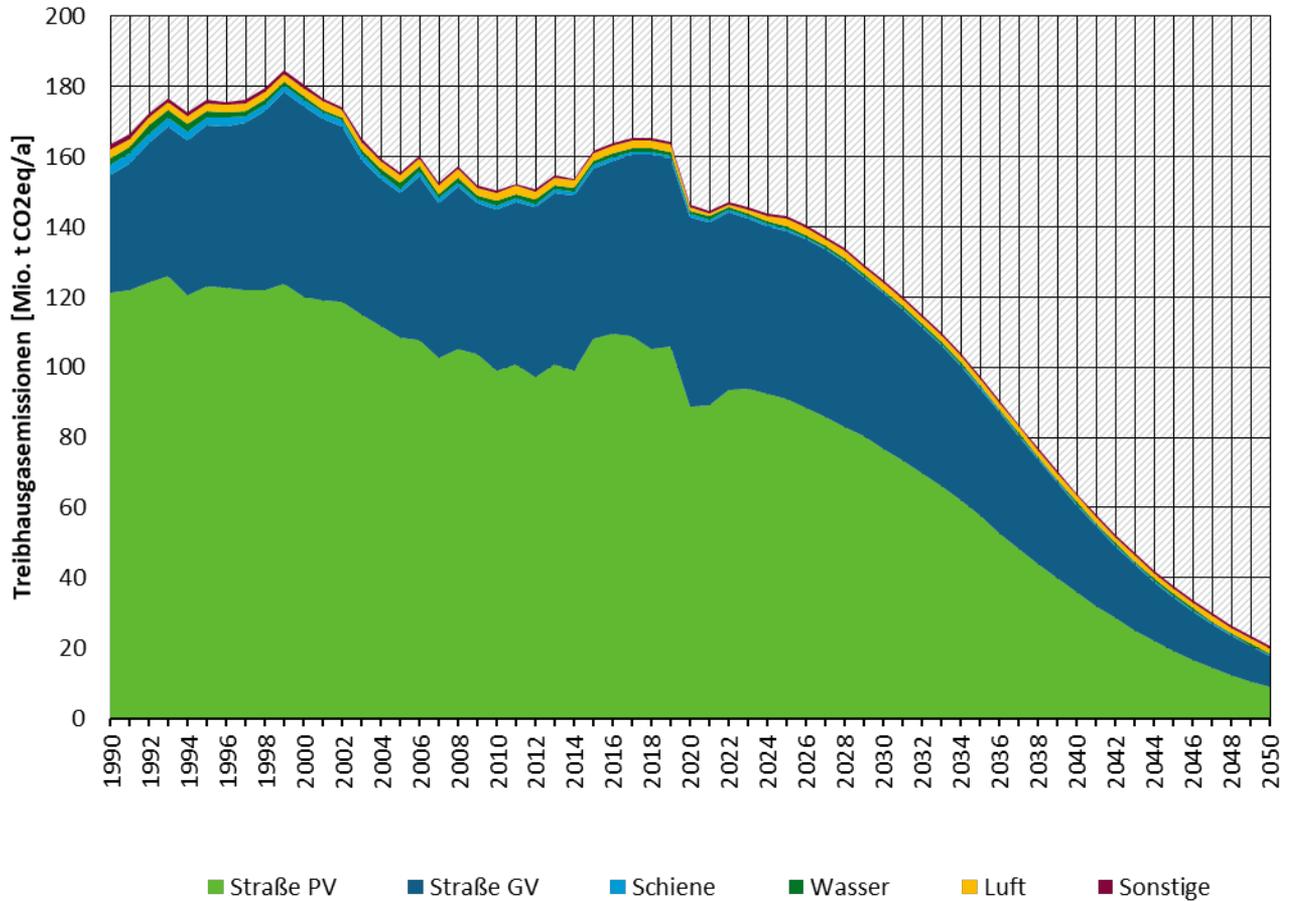
Mit dieser Abgrenzung unterscheiden sich die berichteten Emissionen in der Höhe und im Verlauf von den im Kapitel 4.7.2.4 dargestellten TREMOD-Ergebnissen.

Abbildung 28 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2050 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 bzw. nationaler Flugverkehr) und sonstige nicht in TREMOD erfassten Emittenten (Schmier- und Motoröle, Festbrennstoffe im Schienenverkehr, nationale Seeschifffahrt) in der Abgrenzung des KSG:

- ▶ Der Straßenverkehr hat über die gesamte Zeitreihe den größten Anteil an den Emissionen (98 % im Jahr 2022 bis 97 % Anteil im Jahr 2030 und 86 % im Jahr 2050). Insgesamt liegen die THG-Emissionen des Straßenverkehrs im Jahr 2030 um 16 % niedriger als 2022 und 2050 um 88 % unter dem Niveau von 2022.
- ▶ Der Schienen-, Schiffs- und inländische Flugverkehr haben im nationalen Inventar nur einen geringen Anteil. Die THG-Emissionen des Bahnverkehrs nehmen bis 2050 um 67 % ab, die Binnenschifffahrt um 23 %. Der Flugverkehr verdoppelt sich bis 2025 und nimmt danach wieder langsam ab. 2050 sind die THG-Emissionen gegenüber 2022 um 37 % höher.

In der Folge gehen die Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland im nationalen Inventar von 2022 bis 2030 um 15 % und bis 2050 um 86 % zurück. Das im KSG festgelegte Sektorziel von 85 Millionen Tonnen in 2030 wird im Trendszenario nicht erreicht. Der berechnete Wert für 2030 liegt mit 125 Mio. Tonnen um 40 Mio. Tonnen und damit um 47 % über dem Zielwert. Die 85 Mio. Tonnen werden im Trendszenario erst 7 Jahre später unterschritten. Ebenso wenig werden die Nullemissionen im Jahr 2045 (38 Mio. t) und 2050 (21 Mio. t) erreicht.

Abbildung 28: Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung im Trendszenario bis 2050 in der Abgrenzung des Bundesklimaschutzgesetzes (KSG)



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 (Inländische Seeschifffahrt, Festbrennstoffe im Schienenverkehr, Schmier- und Motoröl im Straßenverkehr); ab 2024 Trendszenario.

Quelle: TREMOD 6.53 vom 30.04.2024; Emissionsübersichten nach Sektoren des Bundesklimaschutzgesetzes 1990 - 2023; Stand: 15.03.2024.

5 Quellenverzeichnis

ACEM (2024): The Motorcycle Industry in Europe. Registration in key European markets 2023.

<https://www.acem.eu/registrations/> (25.03.2024).

AG Energiebilanzen (2023): Heizwerte der Energieträger und Faktoren für die Umrechnung von natürlichen Einheiten in Energieeinheiten zur Energiebilanz 2021 (Stand:08.02.2023). https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2022/04/Heizwerte_2005-2021.pdf (08.02.2023).

AG Energiebilanzen (o.J.): Bilanzen 1990 bis 2030. https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/?wpv-jahresbereich-bilanz=2021-2030&wpv_aux_current_post_id=45&wpv_aux_parent_post_id=45&wpv_view_count=2753-CATRe4257049c177cf191052746afc46d0a3 (10.10.2023).

Allekotte, M.; Biemann, K.; Colson, M.; Heidt, C.; Kräck, J.; Knörr, W. (2024): Aktualisierung des Daten- und Rechenmodells: „Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland (TREMOD)“ und der Datenbank „Mobile Maschinen und Geräte (TREMOD-MM)“ 2022. Texte Umweltbundesamt, Dessau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-des-daten-rechenmodells> (25.04.2024).

Allekotte, M.; Biemann, K.; Heidt, C.; Colson, M.; Knörr, W. (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018) Berichtsteil „TREMOD“. ifeu im Auftrag des Umweltbundesamtes, Heidelberg. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/aktualisierung-tremod-2019> (31.10.2022).

Allekotte, M.; Colson, M.; Heidt, C.; Knörr, W.; Kräck, J. (2023): Verbesserung der Vorjahresschätzung der Klimagasemissionen des Verkehrssektors. ifeu im Auftrag des Umweltbundesamtes, Heidelberg. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/165_2023_klimagasemissionen_des_verkehrssektors_0.pdf (05.02.2024).

BAFA (o.J.): Amtliche Mineralöl Daten für die Bundesrepublik Deutschland. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). https://www.bafa.de/SiteGlobals/Forms/Suche/Infothek/Infothek_Formular.html?nn=8064038&submit=Senden&resultsPerPage=100&documentType=_type_statistic&templateQueryString=Amtliche+Daten+Mineral%C3%B6l+daten&sortOrder=dateOfIssue_dt+desc (10.10.2023).

BALM (2023): Mautdaten Tabellenwerk. https://www.balm.bund.de/DE/Themen/Lkw-Maut/Mautstatistik/mautstatistik_node.html (23.07.2024).

BAST (2023): Verkehrsbarometer - normierte Werte. <https://www.bast.de/DE/Statistik/Verkehrsdaten/Verkehrsbarometer.html> (10.10.2023).

BAST (2024): Verkehrsbarometer - normierte Werte. <https://www.bast.de/DE/Statistik/Verkehrsdaten/Verkehrsbarometer.html> (28.02.2024).

Bäumer, M.; Hautzinger, H.; Pfeiffer, M.; Stock, W.; Lenz, B.; Kuhnimhof, T.; Köhler, K. (2016): Fahrleistungserhebung 2014: Begleitung und Auswertung - Schlussbericht zur Inlandsfahrleistung. Verkehrstechnik Heft V 291 Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, m Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mannheim, Berlin. https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/1775/file/BAST_V_291_barrierefreies_Internet_PDF.pdf (19.09.2023).

BAZL (2017): Anleitung zur Abschätzung von Helikopteremissionen - Helicopter Emissions Table. Bundesamt für Zivilluftfahrt der Schweiz. <https://www.bazl.admin.ch/bazl/de/home/themen/umwelt/schadstoffe/triebwerkemissionen/anleitung-zur-abschaetzung-von-helikopteremissionen.html> (19.09.2023).

Bergk, F.; Biemann, K.; Heidt, C.; Knörr, W.; Lambrecht, U.; Schmidt, T.; Ickert, L.; Schmied, M.; Schmidt, P.; Weindorf, W. (2016): Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. Texte Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschutzbeitrag-des-verkehrs-bis-2050> (30.04.2024).

Biemann, K.; Helms, H.; Münter, D.; Liebich, A.; Pelzeter, J.; Kämper, C. (2024): Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr. Texte Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-der-umweltbilanz-von-kraftfahrzeugen> (30.04.2024).

BLE (2021): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2020. BLE. https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2020.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (10.02.2022).

BLE (2024): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2022. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2022.html&ved=2ahUKEwjesuKinfaFAXUR0wIHHcKEDOUQFn0ECBQQAQ&usg=AOvVaw0yMgvLCWINA-SfQWc3Qyrc (10.04.2024).

BMDV (2021): Mit der Elektrobahn klimaschonend in die Zukunft – Das Bahn-Elektrifizierungsprogramm des Bundes. Bundesministerium für Digitales und Verkehr. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-aktuell/elektrobahn-klimaschonend-zukunft-bahn-elektrifizierungsprogramm.html> (18.11.2022).

BMDV (2022): BMDV unterstützt den Hochlauf des klimafreundlichen Straßengüterverkehrs. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2022/072-wissing-klimafreundliche-nutzfahrzeuge.html>. (22.12.2022).

BMDV (2023): „Prognose 2022“ Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2021-2022. BMDV. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/prognose-berichtgleitende-langfrist-verkehrsprognose.pdf?__blob=publicationFile (19.09.2023).

BMVI (2021): Richtlinie zur Förderung der nachhaltigen Modernisierung von Binnenschiffen Vom 24. Juni 2021. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. https://www.elwis.de/DE/Service/Foerderprogramme/Nachhaltige-Modernisierung-von-Binnenschiffen/Foerderrichtlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (09.12.2022).

Breed, A. K.; Speth, D.; Plötz, P. (2021): CO₂ fleet regulation and the future market diffusion of zero-emission trucks in Europe. In: Energy Policy. Vol. 159, S. 112640. DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112640.

Bundesanzeiger (2021): Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote. http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl121s4458.pdf (16.11.2021).

Destatis (2019a): Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2018. Wiesbaden. https://www.statistischebibliothek.de/mir/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00042646/2080610187004.pdf (11.12.2020).

Destatis (2019b): Niedrigwasser beschert Binnenschiffahrt Rekordminus. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2019/03/PD19_112_463.html (17.01.2020).

Destatis (2023): Personenverkehr mit Bussen und Bahnen. Abgerufen über die GENESIS-Online-Datenbank. <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=46181-0005&bypass=true&levelindex=1&levelid=1699276587764#abreadcrumb> (20.07.2023).

Destatis (o.J.): Güterstatistik der Binnenschiffahrt (Fachserie 8, Reihe 4). Abgerufen über die GENESIS-Online-Datenbank. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=statistikTabellen&selectionname=46321#abreadcrumb> (27.02.2023).

Ecke, L.; Vallee, J.; Chlond, B.; Vortisch, P. (2023): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2022/2023: Alltagsmobilität und Fahrleistung. [object Object]. DOI: 10.5445/IR/1000164704 <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000164704> (14.03.2024).

EEA (2019): 1.A.3.a Aviation 1 Master emissions calculator 2019. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation-1/view>. (11.03.2021).

Eisenmann, C.; Winkler, C.; Köhler, K.; Schulz, A.; Seiffert, I.; Gaus, D.; Link, H. (2021): Verkehr in Zahlen 2021/2022. Berlin. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2021-2022-pdf.pdf?__blob=publicationFile (31.01.2022).

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. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001> (16.11.2023).

EU (2019a): Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 setting CO2 emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011. In: Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 setting CO2 emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0631>. (25.02.2021).

EU (2019b): Regulation of the European Parliament and of the Council setting CO2 emission performance standards for new heavy-duty vehicles and amending Regulations (EC) No 595/2009 and (EU)2018/956 of the European Parliament and of the Council and Council Directive 96/53/EC. European Parliament Brüssel. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-60-2019-INIT/en/pdf> (17.02.2021).

EU (2022a): Richtlinie (EU) 2022/362 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. Februar 2022 zur Änderung der Richtlinien 1999/62/EG, 1999/37/EG und (EU) 2019/520 hinsichtlich der Erhebung von Gebühren für die Benutzung bestimmter Verkehrswege durch Fahrzeuge. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022L0362> (26.03.2024).

EU (2022b): Regulation of the European Parliament and if the Council on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009. https://single-market-economy.ec.europa.eu/system/files/2022-11/COM_2022_586_1_EN_ACT_part1_v8_0.pdf (31.03.2023).

EU (2023a): Verordnung (EU) 2023/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. April 2023 zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631 im Hinblick auf eine Verschärfung der CO2- Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge im Einklang mit den ehrgeizigeren Klimazielen der Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0851&qid=1710487132271> (15.03.2024).

EU (2023b): Reducing CO₂ emissions from heavy-duty vehicles. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/reducing-co2-emissions-heavy-duty-vehicles_en (31.03.2023).

Europäische Kommission (2023): Determination of parameters for the definition of 2025/2030 CO2 emission targets. Joint Research Centre. C4 - European Commission. <https://circabc.europa.eu/ui/group/4cf23472-88e0-4a52-9dfb-544e8c4c7631/library/c2445223-7ca6-4775-8e7e-3014f87573c9/details> (15.03.2024).

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. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_09_2016_aktualisierung_der_eingangsdaten_und_emissionsbilanzen_wesentlicher_biogener_energienutzungspfade_1.pdf (11.10.2023).

Finnair (2023): Annual Report 2022. <https://investors.finnair.com/~media/Files/F/Finnair-IR/documents/en/reports-and-presentation/2023/annual-report-2022.pdf> (07.11.2023).

Fleming, G. G.; de Lépinay, I.; Schaufele, R. (2022): Environmental Trends in Aviation to 2050. https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art7.pdf (19.09.2023).

Heidt, C.; Biemann, K.; Dünnebeil, F.; Jamet, M.; Lambrecht, U.; Althaus, H.-J.; Wüthrich, P.; Hausberger, S. (2019): Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen. TEXTE 12/2019 im Auftrag des Umweltbundesamtes. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-bewertung-von-massnahmen-zur> (19.09.2023).

Heidt, C.; Knörr, W.; Biemann, K.; Notter, B. (2016): Weiterentwicklung des TREMOD-Binnenschiffmoduls. im Auftrag des Umweltbundesamtes. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Publikationen/Mobil%C3%A4t/ifeu_2016_Endbericht_FKZ_3713_47_100_Weiterentwicklung_des_TREMOD_Binnenschiffmoduls.pdf (23.07.2024).

ICAO (2019): Aircraft Engine Emissions Databank. International Civil Aviation Organization. <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank> (29.04.2019).

Icha, P.; Lauf, T. (2023): Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2022. Climate Change Umweltbundesamt, Dessau -Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-treibhausgas-9> (24.11.2023).

Intraplan (2022): Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr - Mittelfristprognose Sommer 2022. https://www.balm.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Verkehrsprognose/Mittelfristprognose_Sommer_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (03.11.2023).

Intraplan (2023): Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr; Mittelfristprognose Winter 2022-2023. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/gleitende-mittelfristprognose-gueter-und-personenverkehr-winter-2022-2023.pdf?__blob=publicationFile (09.11.2023).

Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Klimke, J.; Pelzeter, J.; Räder, D. (2023): My eRoads - Der Weg zu einem klimaneutralen Lkw-Verkehr. Ergebnisse des BMWK-geförderten Forschungsvorhabens My eRoads. Heidelberg, 2023. ifeu, Heidelberg. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Leitf%C3%A4den_und_Brosch%C3%BCren/My_eRoads_Broschuere.pdf.

KBA (2020): Verkehr in Kilometern 2014-2019. KBA. https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/vk_inlaenderfahrleistung_inhalt.html?nn=2351604 (28.04.2021).

KBA (2023): Inländerfahrleistung 2023. KBA. https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/vk_inlaenderfahrleistung_node.html (18.07.2024).

Knörr, W.; Borken, J. (2003): Erarbeitung von Basisemissionsdaten des dieselbetriebenen Schienenverkehrs unter Einbeziehung möglicher Schadstoffminderungstechnologien – Weiterführung und Auswertung des UBA-FuE-Vorhabens 299 43 111. ifeu im Auftrag der Deutschen Bahn AG, Heidelberg. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3275.pdf> (22.09.2023).

Knörr, W.; Heidt, C.; Allekotte, M.; Biemann, K.; Colson, M.; Gores, S. (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018) - Berichtsteil „TREMOD“. Umweltbundesamt, Dessau -Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/aktualisierung-tremod-2019> (19.02.2021).

Knörr, W.; Heidt, C.; Gores, S.; Bergk, F. (2016): „Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2035“ (TREMOD) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014). im Auftrag des Umweltbundesamtes. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Endbericht_TREMOD_2016_160701.pdf (22.09.2023).

Knörr, W.; Heidt, C.; Schmied, M.; Notter, B. (2013): Aktualisierung der Emissionsberechnung für die Binnenschifffahrt und Übertragung der Daten in TREMOD. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. <https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/IFEU-INFRA-2013-Aktualisierung-der-Emissionsberechnung-f%C3%BCr-die-Binnenschifffahrt-und-%C3%9Cbertragung-der-Daten-in-TREMOD3.pdf>.

Krenzer, D. (2024): Förderstopp: Keine Subvention mehr für E-Lkw und E-Busse. <https://www.elektroauto-news.net/news/foerderstopp-e-lkw-und-busse> (25.03.2024).

Ligterink, N. E.; van Gijlswijk, R. N.; Kadijk, G.; Vermeulen, R. J.; Indrajana, A. P.; Elstgeest, M.; van Mensch, P.; de Ruiter, J. M.; Verbeek, R. P.; Hulskotte, J. H. J.; Geilenkirchen, G.; Traa, M. (2019): Emissiefactoren wegverkeer - Actualisatie 2019. TNO, PBL. https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/tno_2019_emissiefactoren_wegverkeer_-_actualisaties_2019.pdf (16.01.2020).

Lufthansa Group (2023): Nachhaltigkeit 2022 - Factsheet. <https://www.lufthansagroup.com/media/downloads/de/verantwortung/LH-Factsheet-Nachhaltigkeit-2022.pdf> (07.11.2023).

Mahmoudi, S.; Frenken, T. (2020): Straßenverkehrszählung 2015 - Ergebnisse. Berichte der BASt, Heft V 327 Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. S. 72. <https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/2353/file/V327.pdf> (18.07.2024).

Matzer, C.; Weller, K.; Dippolt, M.; Lipp, S.; Röck, M.; Rexas, M.; Hausberger, S. (2019): Update of Emission Factors for HBEFA Version 4.1. https://cdn.prod.website-files.com/6207922a2acc01004530a67e/625e8d14b70af84fba1ef10c_HBEFA41_Report_TUG_09092019.pdf (23.07.2024).

Mendelevitch, R.; Repenning, Julia; Chr., M., Felix; Deurer, J. (2024): Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland - Rahmendaten. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgas-projektionen-2024-fuer-deutschland> (25.04.2024).

My eRoads (2022): My eRoads Webseite. Elektro-Lkw-Modelle. <https://www.my-e-roads.de/de-DE/export/fahrzeuge> (22.12.2022).

Notter, B.; Cox, B.; Hausberger, S.; Matzer, C.; Weller, K.; Dippold, M.; Politschnig, N.; Lipp, S.; Allekotte, M.; Knörr, W.; André, M.; Gagnepain, L.; Hult, C.; Jerksjö, M. (2022): HBEFA 4.2 Documentation of Updates. Bern/Graz/Heidelberg/Lyon/Göteborg. https://cdn.prod.website-files.com/6207922a2acc01004530a67e/6217584903e9f9b63093c8c0_HBEFA42_Update_Documentation.pdf (03.02.2022).

NOW GmbH (2023): Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr. Auswertung der Cleanroom-Gespräche 2022 mit Nutzfahrzeugherstellern. <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/wp-content/uploads/2023/02/Marktentwicklung-klimafreundlicher-Technologien-im-schweren-Strassengueterverkehr.pdf> (28.02.2023).

Öko-Institut; IREES (2024): Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland - Rahmendaten (Datentabelle) - Excelfassung der zentralen Rahmendaten. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/deutscher_projektionsbericht2024_rahmendaten.xlsx (25.04.2024).

Prussi, M.; Yugo, M.; De Prada, L.; Padella, M.; Edwards, R.; Lonza, L. (2020): JEC Well-to-Tank report v5, EUR 30269 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-19926-7 (online), doi:10.2760/959137 (online), JRC119036.

PwC (2023): e-Bus Radar 2023. <https://www.pwc.de/de/branchen-und-markte/oeffentlicher-sektor/pwc-e-bus-radar-2023.pdf> (18.03.2024).

Repenning, J.; Harthan, R. O.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Ludig, S.; Matthes, F. C.; Mendelewitsch, R.; Moosmann, L.; Nissen, C.; Rausch, L.; Scheffler, M.; Schumacher, K.; Wiegmann, K.; Wissner, N.; Zerrahn, A.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Rehfeldt, M.; Rohde, C.; Schломann, Dr. B.; Yu, S.; Steinbach, J.; Deurer, J.; Osterburg, B.; Rösemann, C.; Gensior, A.; Rock, J.; Stürmer, W.; Rüter, S.; Fuß, R.; Tiemeyer, B.; Laggner, A.; Adam, S. (2021): Projektionsbericht 2021 für Deutschland. Berlin, Karlsruhe, Eberswalde, Hamburg. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/projektionsbericht_2021_uba_website.pdf (18.11.2022).

SPD; BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN; FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen - Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit - Koalitionsvertrag 2021 - 2025 zwischen der sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), Bündnis 90 / Die Grünen und den freien Demokraten (FDP). Sozialdemokratische Partei Deutschlands, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, Freie Demokratische Partei, Berlin. https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf (18.10.2023).

Tietge, U.; Dornoff, J.; Diaz, S.; Mock, P.; Allekotte, M.; Heidt, C.; Knörr, W.; Althaus, H.-J.; Notter, B.; Oberpiller, Q.; Läderach, A.; Hausberger, S.; Matzer, C.; Eisenmann, C.; Kuhnimhof, T. (2020): Erarbeitung einer Methode zur Ermittlung und Modellierung der CO₂-Emissionen des Kfz-Verkehrs. im Auftrag des Umweltbundesamtes. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erarbeitung-einer-methode-zur-ermittlung> (19.09.2023).

Transport & Environment (2021): Easy Ride: why the EU truck CO₂ targets are unfit for the 2020s. https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/10/202108_truck_CO2_report_final.pdf (22.12.2022).

Umweltbundesamt (2022): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2022 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2020. CLIMATE CHANGE 24/2022 Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. S. 1048. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-05-31_climate-change_24-2022_nir-2022_de.pdf (22.09.2023).

Umweltbundesamt (2023): Emissionsübersichten nach Sektoren des Bundesklimaschutzgesetzes 1990-2022. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2023_03_15_em_entwicklung_in_d_ksg-sektoren_pm.xlsx (10.08.2023).

Umweltbundesamt (2024a): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2022. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2024_01_15_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_thg_v1.0.xlsx (26.04.2024).

Umweltbundesamt (2024b): Emissionsübersichten nach Sektoren des Bundesklimaschutzgesetzes 1990-2023. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2024_03_13_em_entwicklung_in_d_ksg-sektoren_thg_v1.0.xlsx (20.04.2024).

Umweltbundesamt (2024c): Klimaemissionen sinken 2023 um 10,1 Prozent – größter Rückgang seit 1990. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/klimaemissionen-sinken-2023-um-101-prozent> (15.03.2024).

Zweirad-Industrie-Verband (ZIV) (2023): ZIV Zweirad-Industrie-Verband Marktdaten Fahrräder und E-Bikes 2022. https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/ZIV_Marktdatenpraesentation_2023_fuer_GJ_2022.pdf (07.09.2023).

A Fahrleistungen und Verkehrsleistungen des Busverkehrs

A.1 Vorbemerkungen

Die Fahr- und Verkehrsleistungen des Busverkehrs in TREMOD 6.51 für die Berichterstattung beruhen für das Jahr 2022 auf Schätzungen, da die aktuellen Statistiken von DESTATIS nicht rechtzeitig vorlagen (siehe Kapitel 2.2.2.1). Im Dezember 2023 wurden die Daten veröffentlicht. Da die Statistiken z.T. deutliche Abweichungen gegenüber den Schätzungen zeigen, die relevant für die Ableitung spezifischer Emissionskennzahlen des Busverkehr sind, wurden die Berechnung des Busverkehr in einem separaten Szenario kurzfristig aktualisiert. Die aktualisierten Annahmen und Umsetzung in TREMOD ist in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt.

A.2 Fahrleistungen

In TREMOD wird der Busverkehr im Inland bilanziert. Das statistische Bundesamt erfasst die Fahrleistungen des gewerblichen Busverkehrs in Genesis Online, Tabelle 46181-010 differenziert nach

- ▶ Liniennahverkehr
- ▶ Linienfernverkehr
- ▶ Gelegenheitsnahverkehr
- ▶ Gelegenheitsfernverkehr

Zusätzlich sind die Fahrleistungen des Linienfernverkehrs und des Gelegenheitsfernverkehrs in Tabelle 46181-002 nach Inland und Ausland unterschieden. Da der Liniennahverkehr und der Gelegenheitsnahverkehr als Inlandsverkehr angenommen werden kann, lässt sich so die Fahrleistung des gewerblichen Verkehrs mit Bussen im Inland bestimmen.

Zur Fahrleistung des nicht-gewerblichen Busverkehrs liegen keine Informationen vor. Im Jahr 2019 wurde die Fahrleistung als Differenz aus dem Eckwert der gesamten Busfahrleistung nach KBA-ViK (KBA 2023) und der Fahrleistung des gewerblichen Busverkehrs bestimmt. In den Folgejahren wurde die Fahrleistungsentwicklung an die jährlichen Änderungen des gewerblichen Gelegenheitsverkehrs gekoppelt (Details siehe Kapitel 2.2.2.1 sowie Anhang A im Bericht (TREMOD 2022)¹³. Der Anteil des nicht gewerblichen Busverkehrs am sonstigen Busverkehr liegt damit in allen Jahren bei 76,5%.

Die so abgeleiteten Fahrleistungen des Busverkehr bis 2022 sind in Tabelle 101 dargestellt.

Tabelle 101: Fahrleistungen des Busverkehrs 2019-2022 im Inland in TREMOD

In Mrd. km

Zeile	Verkehrsart	Quelle	2019	2020	2021	2022
1	Linienfernverkehr	46181-002 (01.12.23)	0,128	0,049	0,027	0,048
2	Liniennahverkehr	46181-010 (01.12.23)	2,593	2,491	2,643	2,704
3	Gelegenheitsnahverkehr	46181-010 (01.12.23)	0,068	0,017	0,019	0,038

¹³ wird nach Veröffentlichung eingefügt

Zeile	Verkehrsart	Quelle	2019	2020	2021	2022
4	Gelegenheitsfernverkehr	46181-002 (01.12.23)	0,376	0,078	0,098	0,193
5	Gelegenheitsverkehr	(3+4)	0,445	0,096	0,117	0,231
6	Gewerblicher Verkehr	(1)+(2)+(3)+(4)	3,166	2,635	2,788	2,983
7	Gesamter Busverkehr	2019; KBA-ViK ab 2020 berechnet	4,617	2,946	3,171	3,737
8	Nicht-gewerblicher Busverkehr	2019: (7)-(6), danach jährl. Änderung wie (5)	1,451	0,312	0,383	0,753
9	Sonstiger Busverkehr	(5)+(8)	1,896	0,407	0,501	0,984
10	Anteil (8) an (9)	(8)/(9)	76,5%	76,5%	76,5%	76,5%

Quelle: DESTATIS, Stand 01.12.2023, eigene Annahmen und Berechnungen

Die Fahrleistungen im Jahr 2022 unterscheiden sich z.T. deutlich von den Schätzungen für die Berichterstattung (siehe Kapitel 2.2.2.1): Die Fahrleistungen im Linienfernverkehr sind um 20 % niedriger, im Liniennahverkehr um 3,5 % niedriger, im sonstigen Busverkehr dagegen um 8 % höher.

A.3 Verkehrsleistungen

Die Verkehrsleistungen des gewerblichen Busverkehrs werden von DESTATIS nicht getrennt nach Inlands- und Auslandstrecken erfasst, sondern nach Inlandsverkehr und grenzüberschreitenden Verkehr. Der Inlandsverkehr enthält die Strecken auf rein inländischen Relationen. Der grenzüberschreitende Verkehr enthält dagegen die Verkehrsleistung aller Strecken im Inland und Ausland. Für die territoriale Beförderungsleistung in Deutschland (um dieselben Abgrenzungen wie die Inlandsfahrleistungen zu gewährleisten) muss der Teil des grenzüberschreitenden und Transitverkehrs hinzugezählt werden, der in Deutschland stattfindet. Eine Unterteilung des grenzüberschreitenden Verkehrs in Inlands- und Auslandsstrecken ist jedoch nach Einschätzung von DESTATIS nicht möglich. Die Gesamtfahrleistung im Inland und Ausland (Tabelle 102) kann jedoch in Beziehung zur Gesamtverkehrsleistung (Inland und grenzüberschreitend, siehe Tabelle 103) gesetzt werden.

Tabelle 102: Fahrleistungen des Busverkehrs von Destatis 2019 bis 2022 im Inland und Ausland

Fahrleistungen in Mrd. km

Zeile	Verkehrsart	Quelle	2019	2020	2021	2022
1	Linienfernverkehr	46181-010	0,194	0,072	0,037	0,076
2	Liniennahverkehr	46181-010	2,593	2,491	2,643	2,704
3	Gelegenheitsnahverkehr	46181-010	0,068	0,017	0,019	0,038
4	Gelegenheitsfernverkehr	46181-010	0,544	0,102	0,122	0,260
5	Gelegenheitsverkehr	(3+4)	0,612	0,119	0,141	0,298

Quelle: DESTATIS, Stand 1.12.2023

Tabelle 103: Verkehrsleistungen des Busverkehrs 2019 bis 2022 im Inland und Ausland

Verkehrsleistungen in Mrd. Pkm im Inland und Ausland

Zeile	Verkehrsart	Quelle	2019	2020	2021	2022
1	Linienfernverkehr	46181-010	6,299	1,859	0,880	2,484
2	Liniennahverkehr	46181-010	38,310	29,307	30,134	36,127
3	Gelegenheitsnahverkehr	46181-010	1,142	0,283	0,306	0,563
4	Gelegenheitsfernverkehr	46181-010	15,536	2,576	2,940	7,317
5	Gelegenheitsverkehr	(3+4)	16,677	2,859	3,246	7,880

Quelle: DESTATIS, Stand 01.12.2023

Für die Abschätzung der Verkehrsleistungen im Inland wird daher angenommen, dass die mittlere Auslastung je Verkehrsart (Personenkilometer je Fahrzeugkilometer) für den Inlandsverkehr gleich dem Gesamtverkehr (Inland + Ausland) ist.¹⁴ Die folgende Tabelle 104 zeigt die so berechnete Auslastung für die Jahre 2019 bis 2022.

Tabelle 104: Auslastung des Busverkehrs 2019 bis 2022 im Inland und Ausland

Auslastung, Anzahl der Personen im Bus (Personen-km/Fahrzeug-km)

Zeile	Verkehrsart	Quelle	2019	2020	2021	2022
1	Linienfernverkehr	berechnet VL/FL	32,5	25,9	23,9	32,5
2	Liniennahverkehr	berechnet VL/FL	14,8	11,8	11,4	13,4
3	Gelegenheitsnahverkehr	berechnet VL/FL	16,7	16,5	16,1	14,9
4	Gelegenheitsfernverkehr	berechnet VL/FL	28,6	25,3	24,2	28,1
5	Gelegenheitsverkehr	berechnet VL/FL	27,2	24,0	23,1	26,5

Quelle: DESTATIS, Stand 01.12.2023, eigene Berechnungen

Damit lässt sich die Verkehrsleistung je Verkehrsart für die Inlandsstrecken aus der Fahrleistung im Inland multipliziert mit der Auslastung (Inland + Ausland) berechnen. Für den nicht-gewerblichen Busverkehr wird die Auslastung des Gelegenheitsverkehrs angesetzt. Die so berechneten Verkehrsleistungen im Inland sind in Tabelle 105 dargestellt.

Tabelle 105: Verkehrsleistungen des Busverkehrs 2019 bis 2022 im Inland in TREMOD

Verkehrsleistungen in Mrd. Pkm im Inland (berechnet)

Zeile	Verkehrsart	Quelle	2019	2020	2021	2022
1	Linienfernverkehr	FL Inland (1) * Auslastung (1)	4,149	1,260	0,645	1,572
2	Liniennahverkehr	Destatis	38,310	29,307	30,134	36,127
5	Gelegenheitsverkehr	FL Inland (5) * Auslastung (5)	12,115	2,292	2,709	6,109
8	Nicht gewerblicher Busverkehr	FL Inland (8) * Auslastung (5)	39,529	7,478	8,839	19,932

¹⁴ Das Vorgehen ist im Vorjahresbericht im Anhang A beschrieben

Zeile	Verkehrsart	Quelle	2019	2020	2021	2022
9	Sonstiger Busverkehr	(5) + (8) bzw. FL Inland (9) * Auslastung (5)	51,644	9,770	11,549	26,040
10	Anteil (8) an (9)	(8) / (9)	76,5%	76,5%	76,5%	76,5%

Quelle: DESTATIS (01.12.2023), eigene Berechnungen

Die Verkehrsleistungen für den Linienfernverkehr, Liniennahverkehr und Gelegenheitsverkehr sind somit direkt aus den Kennzahlen der DESTATIS-Tabellen 46181-002 und 46181-010 abgeleitet. Der nicht-gewerbliche Busverkehr wird auf Basis der Kennzahlen des Gelegenheitsverkehrs geschätzt. Für Jahr 2019 ist die Differenz der Gesamtfahrleistung aus KBA-ViK und der Fahrleistung des gewerblichen Verkehrs nach DESTATIS die Grundlage. In den Folgejahren wird der nicht-gewerbliche Busverkehr proportional zum Gelegenheitsverkehr fortgeschrieben. Der Anteil des Gelegenheitsverkehrs an den Fahr- und Verkehrsleistungen am sonstigen Busverkehr liegt damit in allen Jahren ab 2019 bei 23,5 %.

A.4 Beförderungsangebot und Auslastung

DESTATIS veröffentlicht in den Statistiken auch Angaben zum Beförderungsangebot in Platzkilometern. Diese werden für die Ableitung der Fahr- und Verkehrsleistungen nicht benötigt, da für die Aufbereitung der Statistik von DESTATIS für TREMOD lediglich die Personen-km und Fahrzeug-km und die Relation Personen-km zu Fahrzeug-km verwendet werden. Da für die Emissionsberechnung eine Angabe zur prozentualen Auslastung in der Einheit „Personenkilometer je Platzkilometer“ benötigt wird, erfolgt in TREMOD eine vereinfachte Ableitung der Platzkilometer aufgrund von für alle Jahre gleich angenommenen Platzkapazitäten je Bustyp und Größenklasse. Diese Werte unterscheiden sich von den Angaben zum Beförderungsangebot von DESTATIS. Da diese Differenz keinen Einfluss auf die Emissionsergebnisse insgesamt und die spezifischen Ergebnisse je Personenkilometer hat, wurden diese Unterschiede bisher nicht aufeinander abgestimmt. Im Detail wäre das auch gar nicht möglich, da die Busflotte je Verkehrsart in der DESTATIS-Statistik nicht erhoben wird und daher nicht mit den detaillierten aus der KBA-Statistik abgeleiteten Fahrzeugbeständen abgeglichen werden kann.

Für die Veröffentlichung der spezifischen Emissionswerte empfehlen wir, die Auslastungswerte aus der DESTATIS-Statistik zu verwenden. Diese leiten sich ab aus der Verkehrsleistung im Inland und Ausland (Tabelle 103) und dem Beförderungsangebot (Tabelle 106).

Tabelle 106: Beförderungsangebot des Busverkehrs 2019 bis 2022 im Inland und Ausland

Beförderungsangebot in Mrd. Platz-km im Inland und Ausland (DESTATIS)

Zeile	Verkehrsart	Quelle	2019	2020	2021	2022
1	Linienfernverkehr	46181-010	11,684	4,237	2,207	4,775
2	Liniennahverkehr	46181-010	197,329	191,990	200,986	205,795
3	Gelegenheitsnahverkehr	46181-010	2,755	0,683	0,797	1,661
4	Gelegenheitsfernverkehr	46181-010	25,422	4,602	5,547	12,477
5	Gelegenheitsverkehr	(3+4)	28,177	5,284	6,344	14,138

Quelle: DESTATIS (01.12.2023)

Die resultierenden Werte sind in Tabelle 107 dargestellt. Die Auslastung des Gelegenheitsverkehrs entspricht auch der Auslastung des nicht-gewerblichen Busverkehrs sowie des sonstigen Busverkehrs insgesamt.

Tabelle 107: Auslastung des Busverkehrs 2019 bis 2022 im Inland und Ausland

Auslastung in Pkm je Platz-km im Inland und Ausland (DESTATIS)

Zeile	Verkehrsart	Quelle	2019	2020	2021	2022
1	Linienfernverkehr	46181-010 (berechnet)	53,9%	43,9%	39,9%	52,0%
2	Liniennahverkehr	46181-010 (berechnet)	19,4%	15,3%	15,0%	17,6%
3	Gelegenheitsnahverkehr	46181-010 (berechnet)	41,4%	41,4%	38,4%	33,9%
4	Gelegenheitsfernverkehr	46181-010 (berechnet)	61,1%	56,0%	53,0%	58,6%
5	Gelegenheitsverkehr	(3) und (4) gewichtet	59,2%	54,1%	51,2%	55,7%

Quelle: DESTATIS (01.12.2023), eigene Berechnungen

B Erfüllung der gesetzlichen Biokraftstoffe Vorgaben zur THG-Minderung

B.1 Gesetzgebung

Die RED II (Renewable Energie Direktive) wurde in nationales Recht über die Anpassung des sogenannten „Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungsquote“ umgesetzt (Bundesanzeiger 2021). Das Gesetz ist am 01.10.2021 in Kraft getreten. Die Zielvorgaben der THG-Quote (aus dem Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG) u.a. 37. BImSchV und 38. BImSchV) sind in Tabelle 108 dargestellt.

Tabelle 108: Geltendes Regulatorium des Bundesimmissionsschutzgesetzes für das TREMOD Trendszenario

	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
THG-Quote Minderungsziele	8%	9,25%	15,5%	12%	14,5%	17,5%	21%	25%
Fortschrittliche Biokraftstoffe (Mindestanteil, energetisch)*	0,3%	0,4%	0,7%	1%	-	1,7%	-	2,6%
Luftverkehr	-	-	-	0,5%	-	1%	-	2%

	2023-2030
Nahrungs- und Futtermittelpflanzen (Obergrenze energetisch)	4,4%
Altspeiseöle und tierische Fette (Obergrenze energetisch)	1,9%
RFNBOs** Renewable fuels of non-biological origin	Mengen werden mit Faktor 2 gerechnet. Laut der Entscheidung des Bundestages vom 14. März 2024, der Neufassung der 37. BImSchV werden RFNBOs mit einem Anrechnungsfaktor von 3 zukünftig anzurechnen, und für den Sektor Schienen, Luft und Schiffsverkehrs geltend (sowie in Raffinerieprozesse)
UER-Maßnahmen ¹⁵	Bis einschließlich 2026 anrechenbar, im Mai 2024 steht der Vorschlag in einem Referentenentwurf zur Änderung der 36. BImSchV die UER dieses Datum auf 2024 vorzuziehen
Sonstiges	Obergrenze für die Anrechenbarkeit von Biokraftstoffen aus Rohstoffen mit hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderung nach § 13b der 38. BImSchV (ab dem Verpflichtungsjahr 2022) ist 0,9% ab 2022 und 0% ab 2023 (darunter Palmöl) Ein Antriebsemissionsfaktor von 0,4 für Batterieelektrische und Brennstoffzelle Fahrzeuge ist zur Abbildung der Antriebseffizienz vorgesehen.

* Mengen oberhalb der Mindestanteils werden mit Faktor 2 gerechnet

**Wichtig für die Anrechenbarkeit auf die THG-Quote ist zudem, dass der zur Herstellung des Wasserstoffs verwendete Strom direkt aus erneuerbaren Quellen stammt und nicht einfach dem Stromnetz entnommen wurde.

¹⁵ Reduktion von CO₂-Emissionen bei der Erdölgewinnung durch Abfackeln (Flaring) und Ablassen (Venting) sowie unkontrolliertes Entweichen von Begleitgasen der Erdölförderung)

Quelle: Darstellung von ifeu, basierend auf 36. BimSchV, 37. BimSchV, 38. BimSchV, BImSchG §37 und Referentenentwurf zur Änderung der 36. BImSchV (21.02.2024)

Bis auf die Änderung der UER-Einrechnung wurden die vorgeschlagenen Änderungen, die sich im aktuellen Referentenentwurf befinden, für das TREMOD-Trendszenario nicht übernommen, da sie von der Bundesregierung noch nicht beschlossen wurden. Aktuell wird auch an der Überarbeitung der THG-Quote im Kontext der dritten Bearbeitung der europäischen Richtlinie für erneuerbare Energien, die sogenannte RED III, gearbeitet. Es ist entsprechend zu erwarten, dass die THG-Quote kurz- bis mittelfristig weiterhin angepasst wird.

B.2 Biomassemix und Emissionsfaktoren

Der Biomassemix bis 2022 wurde anhand der BLE-Daten (BLE 2024) aktualisiert. Das Szenario bis 2050 wurde angepasst, um den höchsten Anteil an Biokraftstoff zu erreichen und die Einhaltung der THG-Quote zu erzielen.

Die Emissionsfaktoren für Ethanol, Biodiesel und Biogas in TREMOD werden aus den Anteilen des jeweiligen Biomassemixes und den spezifischen Emissionsfaktoren ((Fehrenbach et al. 2016) und (Prussi et al. 2020)) pro Biomassetyp errechnet. Im Trendszenario wird dabei eine jährliche Veränderung des durchschnittlichen Biomassemixes und der Produktionsverfahren unterstellt, welche die politischen Vorgaben des Gesetzes für die THG-Quote berücksichtigt.

Die sich ergebenden prozentualen Anteile der jeweiligen Biokraftstoffmische sind in Tabelle 109 dargestellt. Bis zum Jahr 2030 erfolgt dabei eine Verlagerung von Biomasse aus Nahrungs- und Futterpflanzen hin zu fortschrittlichen Biokraftstoffen, z. B. aus Reststoffen.

Dies ist im besonderen Maße bei Ethanol der Fall, da davon ausgegangen wird, dass dieser Kraftstofftyp im Wesentlichen zur Erfüllung der Mindestquote für die fortschrittlichen Biogaskraftstoffe beitragen wird. Grund zu dieser Annahme ist, dass sich derzeit kein Trend in Richtung eines fortschrittlichen Biodiesels (FT-Diesels) erkennen lässt. Biomethan wird aufgrund des niedrigen Anteils an Gasfahrzeugen nur begrenzt zur Quotenerfüllung beitragen. Um insgesamt die Mindestquote von 2,6 % in 2030 zu erreichen, bedarf es daher hoher Anteile an Bioethanol aus Lignozellulose.

Tabelle 109: Biomassemix (Anteile gerundet) der Biokraftstoffe im Trendszenario

Kraftstoff	Kategorie	Biomassetyp	2023	2025	2030
Ethanol	Nahrungs- und Futterpflanzen	Mais, Weizen, Zuckerrohr, Zuckerrübe, andere Getreide	95%	81%	0%
	Fortschrittliche Biokraftstoffe	Ligno-Zellulose (advanced)	5%	19%	100%
Biodiesel/ HVO	Nahrungs- und Futterpflanzen	FAME (Raps-, Soja-, Sonnenblumen- und Palmöl)	56%	60%	70%
	Altspeiseöl und tierische Fette	Altöl/Tierfette	44%	40%	30%
Biogas	Nahrungs- und Futterpflanzen	Silomais	0%	0%	0%
	Fortschrittlichen Biokraftstoffe	Gülle/Mist- Bioabfall (advanced)	100%	100%	100%

Quelle: ifeu/TREMOD 6.53

Da der Anteil an Ethanol in der Beimischung jedoch technisch und rechtlich begrenzt ist, reduziert sich, wie in Tabelle 109 zu sehen, der Anteil des Bioethanols und Biomethan aus Nahrungs- und Futterpflanzen, um die Menge an Fortschrittlichen Biokraftstoffen bis 2030 zu integrieren. Unter diesen Annahmen kann der Mindestanteil von 2,6 % bei fortschrittlichen Biokraftstoffen erreicht werden. In dem Szenario wird ebenfalls die Obergrenze für Altspeiseöle und tierische Fette von 1,9 % am Endenergieverbrauch gemäß der THG-Quote ausgeschöpft. Zwischen den angegebenen Stützjahren werden die Anteile interpoliert, nach 2030 bleiben die Anteile konstant. Darüber hinaus ist Palmöl in Deutschland ab 2023 von der Obergrenze für die Anrechenbarkeit von Biokraftstoffen aus Rohstoffen wegen hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderung (38.BImSchV § 13b) betroffen. Der Ausstieg soll bis zum 31. Dezember 2030 vollzogen sein. Entsprechend wurde Palmöl im Szenario ab 2023 abgeschafft.

Tabelle 110 stellt die sich ergebenden mittleren THG-Emissionsfaktoren der Biokraftstoffe im Trendszenario dar. Bei der Festlegung der Emissionsfaktoren wurde wie folgt vorgegangen: zunächst wurde verschiedene Datengrundlagen auf Aktualität und Plausibilität geprüft. Dazu zählen neben den bisher in TREMOD verwendeten Daten aus dem Projekt BioEm (Fehrenbach et al. 2016), die Standardwerte der RED II, sowie die damit verbundenen Werte aus dem JEC Well-To-Wheels report v5 (Prussi et al. 2020) und die seitens der BLE evaluierten Werte im NaBiSy¹⁶. Dabei wurden die Werte von BioEm als plausible Ausgangslage für das Basisjahr 2019 identifiziert. Die deutlich niedrigen liegenden Emissionswerte der BLE konnten hingegen nicht nachvollzogen werden und werden daher bisher nicht in TREMOD verwendet.

Für die Zeitreihe bis 2030 wurden jedoch Rückgänge der Emissionen aufgrund von technischen Verbesserungen der Herstellungsprozesse und Optimierungen über die gesamte Produktionskette angenommen. Außerdem wirkt sich der veränderte Biomassemix auf die Emissionsfaktoren der einzelnen Biokraftstoffe aus. So nehmen die THG-Emissionen bei Ethanol wegen Umstieg auf fortschrittliche Biokraftstoffe (s.o.) stark ab. Bei Biomethan werden aufgrund der ab 2025 zunehmend eingesetzten Mengen von Gülle/Mist und der damit verbundenen Vermeidung von Methanemissionen auch niedrige Emissionsfaktoren erreicht, welche ein Anreiz für den Ausbau dieses Pfades sein werden¹⁷. Bei Biodiesel sind die Reduktionspotenziale deutlich geringer, da das Potenzial von abfallbasiertem Biodiesel bereits nahezu ausgeschöpft ist. Aufgrund des Phase-out von Palmöl wird Raps eingesetzt. Der Anteil an HVO wird nach der Abschaffung von Palmöl aus Abfall produziert. Nach 2030 bleiben die THG-Emissionsfaktoren konstant.

Tabelle 110: THG-Emissionsfaktoren (g CO₂eq/MJ) der Biokraftstoffe und Biomasse im Trendszenario

Kraftstoff und Biomasse	2023	2025	2030
Ethanol			
Abfall (z. B. Ligno-Zellulose)	8	5	5
Mais	24	25	13
Andere Getreide	25	25	16
Weizen	26	25	18

¹⁶ die staatliche Web-Anwendung Nachhaltige - Biomasse - Systeme

¹⁷ Die Lagerung von unvergorener Gülle gilt als intensive Quelle von Methanemissionen, welche mittels Vergärung über einen Biogasreaktor vermieden werden können. Werden diese Reduktionen als Bonus angerechnet, kann dies sogar zu negativen Emissionen für Biomethan führen, siehe z.B. JEC WTT V.5 (Prussi et al. 2020). Die Anrechnung solcher Emissionsreduktionen ist allerdings wegen der Gefahr der Doppelbilanzierung mit anderen Sektoren umstritten und wird daher für TREMOD nicht durchgeführt.

Kraftstoff und Biomasse	2023	2025	2030
Zuckerrohr	8	5	5
Zuckerrübe	26	25	15
Biodiesel			
Abfall (UCO)	10	10	10
Palmöl	25	abgeschafft	abgeschafft
Raps	35	20	18
Soja	33	25	20
Sonnenblumen	34	25	20
HVO-Palmöl	36	abgeschafft	abgeschafft
HVO-Abfall	34	34	34
Biomethan			
Abfall	18	15	10
Silomais	28	20	20
Gülle	15	13	10

Quelle: ifeu/TREMOD 6.53

B.3 Anteile der Biokraftstoffe und synthetischen Kraftstoffe am Endenergieverbrauch

Der energetische Anteil des Endenergieverbrauchs beträgt nach Aktualisierung der BLE und BAFA-Zahlen von Biodiesel an Diesel im Jahr 2023 6,9% und von Ethanol an Benzin 4,7 % (siehe Tabelle 111). Für das Trendszenario wird ein maximal möglicher Biokraftstoffanteil abgeschätzt, welcher die Anforderungen der möglichen Beimischung für die Fahrzeuge berücksichtigt. Die aktuellen Normen nach DIN EN 590 & DIN EN 228 erlauben eine Beimischung von 7 % (v/v)¹⁸ für Diesel/B7 und 10 % (v/v) für Benzin/E10, welche für die meisten Fahrzeuge zugelassen sind. Für bestimmte Fahrzeuge sind auch höhere Beimischungen oder Reinkraftstoffe zugelassen. Für Diesel sind B20, B30, B100 erlaubt und E85 für Benzin/Ethanol. Darüber hinaus hat HVO keine Beimischung Begrenzung und kann zu 100% konventionellen Diesel ersetzen. Es wird ausgenommen, dass mit der Zeit immer mehr Autos B7 und E10 tanken können (dafür muss das Fahrzeug explizit für die genannten Beimischungen konzipiert werden). Daraus werden folgenden Annahmen für den maximal möglichen Biokraftstoffanteil getroffen:

- ▶ Benzin: Energetisch bis zu 11,5 % bzw. volumetrisch bis zu 7,3 % Ethanol
- ▶ Diesel: Energetisch bis zu 12 % bzw. volumetrisch bis zu 11 % Biodiesel

Für Erdgasfahrzeuge besteht keine Beimischungsgrenze von Biomethan. Der energetische Anteil von Biomethan an NG bleibt ab 2021 daher durchgehend zwischen 70% und 88 %, um die für die Quotenerfüllung erforderliche Gesamtmenge an Biokraftstoffen im Verkehr zu gewährleisten (siehe Tabelle 111).

¹⁸ Volumenkonzentration (zwei Volumen aufeinander bezogen)

Tabelle 111: Anteile Biokraftstoffe und PtX im Trendszenario

Energieträger	2025	2030	2050
Biodiesel an Diesel (energetisch)	8,5 %	12 %	12%
Bioethanol an Benzin (energetisch)	8,4 %	11,3%	11,3%
Biomethan an NG (energetisch)	70,4 %	87,4%	87,4%
PtX in Flugturbinenkraftstoff*	0,5%	2%	2%
PTX Benzin und Diesel*	0%	0%	0%

Anmerkungen: *PtX wird in den Vorkettenemissionsfaktoren der konventionellen Kraftstoffe berücksichtigt

Quellen: eigene Annahmen

Insgesamt ergeben sich folgende Anteile der gemäß RED/THG-Quote unterschiedenen Biomassekategorien an dem gesamten Endenergieverbrauch des Straßen- und nichtelektrischen Schienenverkehrs (Tabelle 112). Im Jahr 2023, werden die Bioanteile (volumetrisch) von 7% in Diesel und 10% in Benzin relativ eingehalten, 2025 bis 2030 wird die Biomischung sukzessive erhöht, bis zu der oben- genannten maximalen Biomischung. Nach 2030 bleiben alle prozentualen Anteile konstant.

Tabelle 112: Anteil der Biomassenmixkategorien nach THG-Quote des TREMOD Trendszenarios

Kraftstoff	2023	2025	2030
Biomasse aus Nahrungs- und Futterpflanzen	4%	4,4 %	4,4 %
Altspeiseöl und tierische Fette	1,9%	1,9 %	1,9 %
fortschrittlichen Biokraftstoffen	0,3%	0,7 %	2,6 %

Quelle: Eigene Annahmen

B.4 Erfüllung der Vorschriften

Erfüllung der überarbeitenden und weiterentwickelnden der THG-Quote

Die Biokraftstoffe müssen seit dem 06.10.2015 bis 2020 je Megajoule Endenergie mindestens um 60% geringere THG-Emissionen haben als fossile Kraftstoffe (siehe Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung §8). Laut der Verordnung zur Neufassung der Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung und der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung vom 02.12.2021 wurden die Anforderungen an die Minderung der Treibhausgasemissionen erhöht: Anlagen, die ab 2021 in Betrieb genommen werden, müssen ein THG-Einsparpotenzial von mindestens 65% nachweisen können¹⁹.

Neben Biokraftstoffen können auch Minderungen der spezifischen THG-Emissionen bis 1,2% durch Reduktion der Upstream-Emissionen (Reduktion von CO₂-Emissionen bei der Erdölgewinnung durch Abfackeln (Flaring) und Ablassen (Venting) sowie unkontrolliertes Entweichen von Begleitgasen der Erdölförderung), Strom und andere alternative Kraftstoffe, z.B. LPG und CNG,

¹⁹ Für existierende Anlagen sind die THG-Einsparpotenziale: mindestens 50 Prozent %, sofern die letzte Schnittstelle, die den Biokraftstoff produziert hat, vor dem oder am 5. Oktober 2015 in Betrieb genommen worden ist und mindestens 60 Prozent, sofern die letzte Schnittstelle, die den Biokraftstoff produziert hat, am oder nach dem 6. Oktober 2015 und bis einschließlich 31. Dezember 2020 in Betrieb genommen worden ist,

angerechnet werden (bezeichnet als UER). Die UER werden im Szenario infolge des Referentenentwurfes zur Änderung der 36. BImSchV bis 2024 berücksichtigt.

Infolge des BImSchG §37a(4)), erweitert durch die 38. BImSchV berechnet sich der Referenzwert, gegenüber dem die Treibhausgasreduzierung zu erfolgen hat, durch Multiplikation des Basiswertes mit der vom Verpflichteten in Verkehr gebrachten energetischen Menge fossilen Otto- und fossilen Dieselmotorkraftstoffs zuzüglich der vom Verpflichteten in Verkehr gebrachten energetischen Menge Biokraftstoff. Der Basiswert beträgt 94,1 kg CO_{2e}/GJ (WTW Kilogramm Kohlendioxid-Äquivalent pro Gigajoule). Treibhausgasemissionen des elektrischen Stroms werden durch Multiplikation der energetischen Menge des zur Verwendung in den Straßenfahrzeugen mit Elektroantrieb entnommenen Stroms mit dem Wert für die durchschnittlichen Treibhausgasemissionen pro Energieeinheit des Stroms in Deutschland und dem Anpassungsfaktor für die Antriebseffizienz nach Anlage 3 (Anpassungsfaktor von 0,4 für die Antriebseffizienz für batteriegestützten Elektroantrieb und wasserstoffzellengestützten Elektroantrieb) berechnet. Dem an UBA angemeldeter Stromverbrauch im Straßenverkehr wird ein Anrechnungsfaktor von 3 attribuiert, während RFNBOs (für alle Verkehrsträger) mit einem Anrechnungsfaktor von 2 berechnet werden. Nach 2023 ist ein Faktor 3 auch für RFNBOs wie in der Neufassung der 37. BImSchV spezifiziert angewendet.

Zur Quotenerfüllung sind die Menge an Diesel, Benzin und Erfüllungsoptionen (inkl. der Anrechnungsfaktoren) zu berücksichtigen. Andere konventionelle Kraftstoffe sind von der Quote nicht abgedeckt.

Tabelle 113 stellt die Ergebnisse zur Quotenerfüllungen des TREMOD Szenarios ab dem Verpflichtungsjahr 2023 dar. Die THG-Quote wird in keinem der Jahre erfüllt. Wäre ausschließlich Ökostrom für den Straßenverkehr eingesetzt, würde die THG-Quote 2030 eingehalten. Aber mit der verbrauchten Strommenge wäre jedes Jahr der Schwellenwert der 37.BImSchV §37h überschritten (Schwellenwert sollte sich aber mit der Überschreitung erhöhen, dieser Effekt ist hier nicht angerechnet). Zum Beispiel führt die Erhöhung des Zieles in 2030 (ohne Abrechnung der früheren Überschreitungen) um 2,3% zu einem neuen Ziel von -27,3%. In diesem Fall würde dann die THG-Quote auch mit Ökostrom nicht erreicht.

Tabelle 113: Ergebnisse der THG-Quote im TREMOD-Trendszenario

Wert	2023	2025	2030
Biokraftstoffanteil gesamt (MJ/MJ)	6,3%	6,8%	7,2%
Mittlere THG-Minderung Biokraftstoffe gegenüber fossilem Basiswert (94,1 gCO _{2e} /MJ)	-75%	-82%	-82%
THG-Reduktion insgesamt ohne UER	-5,1%	-7,6%	-21,4%
THG-Reduktion insgesamt mit UER	-6,3%	UER nicht mehr anrechenbar	UER nicht mehr anrechenbar
THG-Minderungsziel	-8%	-10,5%	-25%

Quellen: KsPr 2030, TREMOD: Endenergieverbrauch 2022 nach eigener Berechnung, THG-Minderung gemäß BioEM und RED II Typical, eigene Berechnungen gemäß Vorgaben BImSchG §37a(4)) und 38. BImSchV

C Zusatzinformationen

C.1 Heizwerte und Absatzmengen

Die Absatzmengen der Kraftstoffe werden in der AMS in Masseinheiten (Gramm oder Tonnen) angegeben. Da die VEdV wie auch die Berichterstattung im Inventar auf Basis der physikalischen Einheiten in Joule angegeben werden, werden die Mengen der AMS mit den Heizwerten nach Angaben der AG Energiebilanzen umgerechnet. Tabelle 114 zeigt die verwendeten Heizwerte für die Kraftstoffe in den VEdV 2023.

Tabelle 114: Heizwerte für die Umrechnung der masse-bezogenen Energiemengen der AMS in physikalische Mengen (2023)

	Diesel	Biodiesel	Benzin	Bioethanol	Kerosin	Flugbenzin
Heizwert in kJ/kg	42.722	37.542	43.543	26.658	42.800	43.516

Quelle: (AG Energiebilanzen 2023)

Schließlich sind die von der AMS für das Jahr 2022 angegebenen Inlandsablieferungen in Tonnen und TJ in Tabelle 115 dargestellt (siehe auch Tabelle 68 in Kapitel 3.6.1).

Tabelle 115: Inlandsablieferungen der Kraftstoffe der VEdV 2023

Inlandsablieferungen	Diesel	Biodiesel	Benzin	Bioethanol	Kerosin	Flugbenzin
Menge in t	30.916.345	2.615.887	16.204.970	1.246.514	9.455.490	3.056
Menge in TJ	1.320.808	97.421	705.613	33.230	404.695	133

Quelle: AMS, Dezember 2023 vorvorläufig (BAFA o.J.)