

TEXTE

76/2024

Endbericht

Aktualisierung des Daten- und Rechenmodells: „Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland (TREMOMOD)“ und der Datenbank „Mobile Maschinen und Geräte (TREMOMOD-MM)“ 2022

von:

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

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 76/2024

Projektnummer 171989

FB001223

Endbericht

Aktualisierung des Daten- und Rechenmodells: „Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland (TREMODO)“ und der Datenbank „Mobile Maschinen und Geräte (TREMODO-MM)“ 2022

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:

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH – ifeu
Wilckensstraße 3
69121 Heidelberg

Abschlussdatum:

März 2023

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, April 2024

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

Kurzbeschreibung: Aktualisierung des „Daten- und Rechenmodells: „Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland (TREMOD)“ und der Datenbank „Mobile Maschinen und Geräte (TREMOD-MM)“ 2022

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

Das aktuelle Vorhaben diente der Aktualisierung und Ergänzung von TREMOD. Für alle Verkehrsträger wurden die Bestands- und Fahr- und Verkehrsleistungsdaten bis zum Jahr 2021 fortgeschrieben. Anschließend wurde das Trendszenario bis zum Jahr 2050 aktualisiert.

Die aktuelle Fortschreibung der Basisdaten bis zum Jahr 2021 für die Emissionsberichterstattung im Nationalen Inventarbericht 2023 ist in der TREMOD-Version 6.41 vom 15.09.2022 enthalten. Die Aktualisierung des Trendszenarios wurde schließlich in der TREMOD-Version 6.43 vom 31.03.2023 realisiert.

Abstract: Update of the TREMOD/TREMOM-MM models for emissions reporting 2023 (reporting period 1990-2021)

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

The current project served to update and supplement TREMOD. For all modes of transport, the inventory, driving and traffic performance data were updated until 2021. Subsequently, the trend scenario was updated until 2050.

The current update of the basic data up to 2021 for emissions reporting in the National Inventory Report 2023 is contained in TREMOD Version 6.41 of 15.09.2022. The update of the trend scenario was finally implemented in TREMOD version 6.43 of 31.03.2023

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	11
Abkürzungsverzeichnis.....	17
Zusammenfassung.....	20
Summary.....	24
1 Grundlagen und Kennzahlen.....	28
1.1 Energetische Kennzahlen und Umrechnungsfaktoren.....	28
1.2 Treibhausgasemissionen.....	30
1.3 Schwefeldioxid- und Bleiemissionen.....	32
1.4 Emissionsfaktoren der Vorketten.....	32
1.4.1 Konventionelle Kraftstoffe.....	32
1.4.2 Strom.....	33
1.4.3 Biokraftstoffe.....	34
1.4.4 Synthetische Kraftstoffe.....	34
2 Aktualisierung der Zeitreihe 1990-2021.....	36
2.1 Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr.....	36
2.2 Straßenverkehr.....	38
2.2.1 Fahrzeugbestand.....	38
2.2.2 Fahrleistungen.....	43
2.2.2.1 Personenverkehr.....	43
2.2.2.2 Güterverkehr.....	46
2.2.2.3 Fahrleistungen auf dem nachgeordneten Netz auf Basis der Verkehrsstärken der Länder.....	52
2.2.2.4 Zeitreihe der Fahrleistungen 1990-2021.....	55
2.2.3 Energieverbrauch und Emissionsfaktoren.....	56
2.2.3.1 Übersicht.....	56
2.2.3.2 Übernahme der Emissionsfaktoren.....	56
2.2.3.3 Anpassung Alterungsfunktionen und Laufleistungseinfluss.....	57
2.2.3.4 Differenzierung des NO ₂ /NO _x -Verhältnisses in Abhängigkeit vom Fahrzeugalter.....	58
2.2.3.5 Übernahme der aktuellen Daten zu Pkw mit Softwareupdates.....	58
2.2.3.6 Differenzierung der SNF und Busse Euro-VI nach Emissionsstufen A-C und D-E.....	59
2.2.3.7 Anpassung der Effizienzentwicklung bei Pkw, LNF, SNF und Bus.....	59
2.2.3.8 Übernahme der neuen Verbrauchswerte für BEV und PHEV.....	60

2.2.3.9	Anpassung der Anteilsfaktoren (Verbrenner-/Elektrischer Betrieb) bei PHEV	60
2.2.3.10	Integration von Wasserstofffahrzeugen und anderer Technologien	60
2.3	Schienenverkehr	62
2.3.1	Abgrenzung Schienenverkehr	62
2.3.2	Berechnungsmethodik.....	63
2.3.3	Verkehrs- und Betriebsleistungen	63
2.3.4	Energieverbrauch.....	65
2.3.5	Emissionsfaktoren.....	67
2.4	Binnenschifffahrt.....	68
2.4.1	Abgrenzung und Berechnungsmethodik Binnenschifffahrt	68
2.4.2	Verkehrs- und Fahrleistungen.....	68
2.4.3	Energieverbrauch.....	69
2.4.4	Emissionsfaktoren.....	70
2.5	Flugverkehr	71
2.5.1	Übersicht.....	71
2.5.2	Berechnungsmethodik.....	72
2.5.2.1	Bottom up Berechnung.....	72
2.5.2.2	Top-Down Abgleich für die Emissionsberichterstattung	73
2.5.3	Verkehrs- und Betriebsleistungen	74
2.5.4	Kraftstoffverbrauch.....	76
2.5.5	Schadstoffe	80
2.6	Energiebilanz.....	82
2.6.1	Vergleich Kraftstoffabsatz mit dem Inlandsverbrauch	85
2.7	Ergebnisse	88
2.7.1	Energieverbrauch und Emissionen	88
2.7.1.1	Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs nach Energieträgern.....	89
2.7.1.2	Endenergieverbrauch aller Verkehrsträger	90
2.7.1.3	Direkte Abgasemissionen des Straßenverkehrs	91
2.7.1.4	Treibhausgasemissionen des Verkehrs nach Territorialprinzip.....	93
2.7.1.5	Treibhausgasemissionen des Verkehrs im nationalen Inventarbericht (NIR)	94
2.7.2	Ursachen für Änderungen gegenüber der Version 6.21.....	96
2.7.2.1	Fahrleistungen Straßenverkehr	96
2.7.2.2	Energieverbrauch Straßenverkehr.....	98
2.7.2.3	Stickstoffoxidemissionen	101

2.7.2.4	Stickstoffdioxidemissionen	106
2.7.2.5	Abgas-Partikelemissionen.....	111
3	Aktualisierung des Trendszenarios 2022 bis 2050	117
3.1	Definition des Trendszenarios	117
3.2	Entwicklung der Verkehrsleistungen	118
3.3	Straßenverkehr	120
3.3.1	Annahmen zur Fahrleistungsentwicklung im Straßenverkehr.....	120
3.3.2	Entwicklung der Fahrzeugflotten.....	120
3.3.2.1	Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge	121
3.3.2.2	Schwere Nutzfahrzeuge und Busse	124
3.3.2.3	Motorisierte Zweiräder und sonstige Fahrzeugkategorien	127
3.3.3	Entwicklung der Energieeffizienz.....	128
3.3.3.1	Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge	128
3.3.3.2	Schwere Nutzfahrzeuge und Busse, motorisierte Zweiräder	133
3.3.3.3	Motorisierte Zweiräder und sonstige Fahrzeugkategorien	135
3.3.4	Entwicklung der spezifischen Emissionen.....	135
3.4	Schienenverkehr	135
3.4.1	Betriebsleistung und Auslastung	135
3.4.2	Entwicklung der Energieeffizienz.....	137
3.4.3	Entwicklung der spezifischen Emissionen.....	137
3.5	Binnenschifffahrt.....	138
3.5.1	Auslastung und zurückgelegte Schiffskilometer	138
3.5.2	Entwicklung der Energieeffizienz.....	138
3.5.3	Entwicklung der spezifischen Emissionen.....	139
3.6	Flugverkehr	139
3.6.1	Entwicklungen der Verkehrsleistung und Flugzeugkilometer	139
3.6.2	Entwicklungen der spezifischen Emissionen	142
3.6.3	Entwicklungen der Gesamtemissionen.....	142
3.7	Ergebnisse	143
3.7.1	Verkehrs- und Fahrleistungen.....	143
3.7.2	Energieverbrauch und Emissionen	146
3.7.2.1	Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs nach Energieträgern.....	146
3.7.2.2	Endenergieverbrauch aller Verkehrsträger	147
3.7.2.3	Direkte Abgasemissionen des Straßenverkehrs	148

3.7.2.4	Treibhausgasemissionen des Verkehrs nach Territorialprinzip.....	150
3.7.2.5	Treibhausgasemissionen des Verkehrs nach Bundesklimaschutzgesetz (KSG).....	152
4	Quellenverzeichnis	154
A	Bestände, Fahrleistungen und Verkehrsleistungen des Busverkehrs	160
A.1	Vorbemerkungen	160
A.2	Fahrzeugbestände.....	160
A.3	Fahrleistungen	162
A.4	Verkehrsleistungen	165
A.5	Fazit und weiteres Vorgehen	167
B	Biokraftstoffe und synthetische Kraftstoffe zur Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben zur THG-Minderung.....	168
B.1	Biokraftstoffe	168
B.2	Biomassemix und Emissionsfaktoren.....	169
B.3	Anteile der Biokraftstoffe und synthetischen Kraftstoffe am Endenergieverbrauch	171
B.4	Erfüllung der Vorschriften.....	172

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung der Gesamtemissionen bis 2022 und im Trendszenario bis 2050 nach KSG.....	23
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.....	27
Abbildung 3:	Vergleich des in TREMOD ermittelten Kerosinverbrauchs im Flugverkehr (auf HVF) mit Angaben von Fluggesellschaften für das Jahr 2021.....	73
Abbildung 4:	Vergleich der Anteile des Kerosinverbrauchs des nationalen Flugverkehrs am Gesamtkerosinverbrauch nach TREMOD und Eurocontrol.....	74
Abbildung 5:	Entwicklung der Starts, Flugzeugkilometer und Verkehrsleistungen des Flugverkehrs in Deutschland 1990-2021.....	76
Abbildung 6:	Jährlicher Energiebedarf (Flugbenzin und Kerosin) des Flugverkehrs in Deutschland nach TREMOD, Eurocontrol und Energiebilanz.....	77
Abbildung 7:	Energiebedarf (Flugbenzin und Kerosin) für den nationalen, internationalen und gesamten Flugverkehr.....	78
Abbildung 8:	Anteil der LTO-Phase am Kraftstoffverbrauch.....	79
Abbildung 9:	Kraftstoffverbrauch pro Personenkilometer im nationalen und internationalen Flugverkehr.....	80
Abbildung 10:	NO _x -, CO-, HC- und PM-Emissionen des nationalen Flugverkehrs auf den ausgewählten Flughäfen 1990-2021.....	81
Abbildung 11:	NO _x -Emission des gewerblichen Flugverkehrs in der LTO-Phase im Jahr 2021 differenziert nach Flughäfen [t/a].....	82
Abbildung 12:	Energieverbrauch des Straßenverkehrs in Deutschland nach Energieträgern - Entwicklung des Endenergieverbrauchs bis 2021.....	90
Abbildung 13:	Energieverbrauch des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung des Endenergieverbrauchs bis 2021.....	91
Abbildung 14:	Stickstoffoxidemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen bis 2021.....	92
Abbildung 15:	Abgaspartikelemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen bis 2021.....	93
Abbildung 16:	Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung der Gesamtemissionen bis 2021.....	94
Abbildung 17:	Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung bis 2021 in der Abgrenzung der Emissionsberichterstattung.....	96

Abbildung 18:	Verkehrsleistungen des Personenverkehrs in Deutschland nach Verkehrsträgern von 1990 bis 2021 und im Trendszenario bis 2050.....	144
Abbildung 19:	Verkehrsleistungen des Güterverkehrs in Deutschland nach Verkehrsträgern von 1990 bis 2021 und im Trendszenario bis 2050.....	145
Abbildung 20:	Fahrleistungen des Straßenverkehrs in Deutschland nach Verkehrsarten und Antrieben von 1990 bis 2021 und im Trendszenario bis 2050.....	146
Abbildung 21:	Energieverbrauch des Straßenverkehrs in Deutschland nach Energieträgern - Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Trendszenario bis 2050.....	147
Abbildung 22:	Energieverbrauch des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Trendszenario bis 2050.....	148
Abbildung 23:	Stickstoffoxidemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen im Trendszenario bis 2050.....	149
Abbildung 24:	Abgaspartikelemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen im Trendszenario bis 2050.....	150
Abbildung 25:	Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung der Gesamtemissionen im Trendszenario bis 2050	151
Abbildung 26:	Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung im Trendszenario bis 2050 in der Abgrenzung des Bundesklimaschutzgesetzes (KSG)	153
Abbildung 27:	Beschlossene Anpassungen des Gesetzes zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungsquote.....	168

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Dichte für Kraftstoffe (in kg/l)	28
Tabelle 2:	Heizwerte für Kraftstoffe (in MJ/kg).....	28
Tabelle 3:	Kennzahlen der Zertifizierungskraftstoffe im HBEFA	30
Tabelle 4:	Direkte CO ₂ -Emissionsfaktoren für Kraftstoffe und Gase	30
Tabelle 5:	Direkte Blei- und SO ₂ -Emissionsfaktoren für Kraftstoffe und Gase im Verkehr	32
Tabelle 6:	Stromerzeugung im TREMOD-Trendszenario	33
Tabelle 7:	Berechnete Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung in g CO ₂ eq/ kWh in verschiedenen Szenarien und UBA-Realwerte als Grundlage für das TREMOD-Trendszenario.....	34
Tabelle 8:	Definition der Synthetischen Kraftstoffe in TREMOD	35
Tabelle 9:	Verkehrsleistungsentwicklung 2010-2021	37

Tabelle 10:	Berücksichtigte Antriebsarten pro Fahrzeugkategorie bis zum Bezugsjahr 2020	38
Tabelle 11:	Entwicklung des Pkw-Bestands nach Antriebsart 2000-2021 ..	38
Tabelle 12:	Entwicklung des LNF-Bestands von 2000-2021 nach Antriebsart	39
Tabelle 13:	Entwicklung des SNF-Bestands nach Antrieben 2000-2021.....	40
Tabelle 14:	Entwicklung des Busbestands von 2000-2021 insgesamt und Anteil der Linienbusse nach Antriebsart	41
Tabelle 15:	Entwicklung des KR-, KKR- und Pedelec-Bestands nach Antrieben 2000-2021.....	42
Tabelle 16:	Jährliche Änderungsrate der DTV laut Verkehrsbarometer	44
Tabelle 17:	Fahrleistungen des MIV in TREMOD 2019-2021	44
Tabelle 18:	Busfahrleistung in TREMOD	45
Tabelle 19:	Änderung der Fahrleistung auf Autobahn laut Mautstatistik ..	47
Tabelle 20:	Anteil an der Güterverkehrsfahrleistung je Fahrzeugkategorie ab 2019 im Verkehrsbarometer	47
Tabelle 21:	Wachstumsrate der Fahrleistung bzw. der DTV auf Autobahnen und Bundesstraßen laut Mautstatistik und Verkehrsbarometer	48
Tabelle 22:	Fahrleistung des Güterverkehrs 2019-2021	48
Tabelle 23:	Schwerverkehrsfahrleistung Verteilung je nach Fahrzeugkategorie auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen	49
Tabelle 24:	Fahrleistungen der SNF nach Straßenkategorien 2014-2019 ..	50
Tabelle 25:	Verteilung der Lastzugfahrleistung auf Autobahnen und Bundesstraßen	51
Tabelle 26:	Fahrleistung der LNF nach Straßenkategorien 2015-2021.....	52
Tabelle 27:	Abschnittslängen (freie Strecke) der Landesstraßen der Bundesländer und deren Anteile an der Gesamtlänge der Straßenkategorie im Bundesgebiet.....	53
Tabelle 28:	Übersicht zu verfügbaren bereitgestellten Datenquellen und -inhalte der Bundesländer zu verschiedenen Veröffentlichungszeiträumen.....	53
Tabelle 29:	Fahrleistung in Deutschland nach Fahrzeugkategorien 1990-2021	55
Tabelle 30:	CO ₂ -Emissionen aus der Typzulassung (NEFZ) und abgeleitete reale CO ₂ -Emissionen der Pkw-Neuzulassungen in Deutschland 2011 bis 2021	59
Tabelle 31:	CO ₂ -Emissionen aus der Typzulassung (NEFZ) und abgeleitete reale CO ₂ -Emissionen der LNF-Neuzulassungen in Deutschland 2011 bis 2021	60
Tabelle 32:	Elektrischer Fahrleistungsanteil bei PHEV-Pkw.....	60
Tabelle 33:	In TREMOD verwendete Antriebsarten in Deutschland.....	61

Tabelle 34:	Verbräuche von Brennstoffzellenfahrzeugen	62
Tabelle 35:	Verkehrsleistungsentwicklung des Personenverkehrs der Eisenbahnen in Deutschland 1994-2021	63
Tabelle 36:	Verkehrsleistungsentwicklung des Güterverkehrs der Eisenbahnen in Deutschland 1994-2021	64
Tabelle 37:	Berechneter Dieserverbrauch der Eisenbahnen in Deutschland im Vergleich mit der Energiebilanz 1994-2021	66
Tabelle 38:	Emissionsfaktoren des dieselbetriebenen Schienenverkehrs für ausgewählte Jahre	67
Tabelle 39:	Verkehrs- und Fahrleistung der Binnenschifffahrt 1995-2020.	68
Tabelle 40:	Verkehrsleistung und Energieverbrauch der Binnenschifffahrt 1995-2021.....	69
Tabelle 41:	Kennwerte für die Absterbefunktion von Binnenschiffsmotoren	70
Tabelle 42:	Mittlere Emissionsfaktoren der Binnenschifffahrt (in g/kg) für ausgewählte Jahre	71
Tabelle 43:	Kraftstoffabsatz in Deutschland nach Energiebilanz 1990-2021	83
Tabelle 44:	Vergleich Verbrauch im Inland und Absatz für Benzin und Diesel im Straßenverkehr 1990-2021	85
Tabelle 45:	Anpassungsfaktoren Kraftstoffabsatz Energiebilanz / Inlandsverbrauch TREMOD 1990-2021	87
Tabelle 46:	Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 – Fahrleistungen	97
Tabelle 47:	Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 – spezifischer Energieverbrauch.....	98
Tabelle 48:	TREMOMM-Version 6.41 – gesamter Energieverbrauch Inland ..	99
Tabelle 49:	Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 – Energieverbrauch Inland	100
Tabelle 50:	TREMOMM-Version 6.41 – NO _x -Emissionsfaktoren.....	102
Tabelle 51:	Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 – spezifische NO _x -Emissionsfaktoren	103
Tabelle 52:	TREMOMM-Version 6.41 – NO _x -Emissionen des Straßenverkehrs im Inland	104
Tabelle 53:	Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 –NO _x -Emissionen des Straßenverkehrs im Inland.....	105
Tabelle 54:	TREMOMM-Version 6.41 – NO ₂ -Emissionsfaktoren.....	106
Tabelle 55:	Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 – spezifische NO ₂ -Emissionsfaktoren	108
Tabelle 56:	TREMOMM-Version 6.41 – NO ₂ -Emissionen des Straßenverkehrs im Inland	109
Tabelle 57:	Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 –NO ₂ -Emissionen des Straßenverkehrs im Inland.....	110

Tabelle 58:	TREMOMM-Version 6.41 – Abgas-Partikel-Emissionsfaktoren (in g/km)	111
Tabelle 59:	Vergleich der TREMOMM-Version 6.41 gegenüber TREMOMM 6.21 – spezifische Abgas-Partikel-Emissionsfaktoren	112
Tabelle 60:	TREMOMM-Version 6.41 – Abgas-Partikel-Emissionen des Straßenverkehrs im Inland	114
Tabelle 61:	Vergleich der TREMOMM-Version 6.41 gegenüber TREMOMM 6.21 – Abgas-Partikel-Emissionen des Straßenverkehrs im Inland	115
Tabelle 62:	Sozio-ökonomische Randbedingungen für das TREMOMM-Trendszenario	117
Tabelle 63:	Verkehrsleistungsentwicklung 2019-2050	119
Tabelle 64:	Entwicklung der Fahrleistungen 2019-2050	120
Tabelle 65:	Anteil der Neuzulassungen der Pkw im Trendszenario nach Antriebsart	121
Tabelle 66:	Entwicklung der Pkw-Bestände im Trendszenario bis 2050	122
Tabelle 67:	Anteil der Neuzulassungen der LNF im Trendszenario nach Antriebsart	123
Tabelle 68:	Entwicklung der LNF-Bestände im Trendszenario bis 2050	124
Tabelle 69:	Anteil der Neuzulassungen der SNF im Trendszenario nach Antriebsart	126
Tabelle 70:	Anteil der Neuzulassungen der Linien- und Reisebusse im Trendszenario nach Antriebsart	127
Tabelle 71:	Anteil der Neuzulassungen motorisierter Zweiräder im Trendszenario nach Antriebsart	128
Tabelle 72:	CO ₂ -Emissionen nach NEFZ und Hybridanteile für Otto- und Diesel-Pkw 2005-2035	129
Tabelle 73:	CO ₂ -Emissionen nach NEFZ für PHEV, LPG- und CNG-Pkw 2015-2035	129
Tabelle 74:	CO ₂ -Emissionen nach NEFZ und Grenzwert in NEFZ 2025 und 2030	130
Tabelle 75:	Elektrische Fahranteile von Pkw-PHEV	130
Tabelle 76:	Reale CO ₂ -Emissionen und Stromverbrauch bei Pkw-Neuzulassungen im Szenario	131
Tabelle 77:	CO ₂ -Emissionen nach NEFZ und Hybridanteile für Otto- und Diesel-LNF 2015-2035	132
Tabelle 78:	CO ₂ -Emissionen nach NEFZ für PHEV-LNF und CNG-LNF 2015-2035	132
Tabelle 79:	CO ₂ -Emissionen nach NEFZ und Grenzwert in NEFZ 2025 und 2030	132
Tabelle 80:	Reale CO ₂ -Emissionen und Stromverbrauch bei LNF-Neuzulassungen im Szenario	133

Tabelle 81:	Anteil von Nullemissions-Lkw und Reduktion des Kraftstoffverbrauchs für Verbrenner-Lkw im Jahr 2030 nach verschiedenen Szenarien.....	134
Tabelle 82:	Reduktion der spezifischen CO ₂ -Emissionen bei SNF im Trendszenario	134
Tabelle 83:	Reduktion der spezifischen CO ₂ -Emissionen bei Bussen im Trendszenario	135
Tabelle 84:	Entwicklung der Auslastungsgrade im Güter-, Personenfern- und Personennahverkehr	136
Tabelle 85:	Entwicklung des Dieselanteils an den Betriebsleistungen im Güter-, Personenfern- und Personennahverkehr	136
Tabelle 86:	Emissionsgrenzwerte Schienenverkehr (g/kWh)	137
Tabelle 87:	Mittlere Emissionsfaktoren der Binnenschifffahrt (in g/kg Dieselkraftstoff) im Trendszenario	139
Tabelle 88:	Anzahl Starts.....	140
Tabelle 89:	Änderungen des Aufkommens und der mittleren Flugweite pro Flug ggü. 2019.....	140
Tabelle 90:	Verkehrsleistungen (Personen und Güter) des gesamten Flugverkehrs im Szenario.....	141
Tabelle 91:	Emissionen des Flugverkehrs im Szenario.....	142
Tabelle 92:	Kategorien des Busverkehrs	161
Tabelle 93:	Fahrleistungen des Busverkehrs im Jahr 2019 im Inland in TREMOD	163
Tabelle 94:	Fahrleistungen des Busverkehrs im Jahr 2020 im Inland in TREMOD	163
Tabelle 95:	Fahrleistungen des Busverkehrs im Jahr 2021 im Inland in TREMOD	164
Tabelle 96:	Fahrleistungen des Busverkehrs von Destatis im Jahr 2019 und 2020 im Inland und Ausland	165
Tabelle 97:	Verkehrsleistungen des Busverkehrs im Jahr 2019 und 2020 im Inland und Ausland.....	165
Tabelle 98:	Auslastung des Busverkehrs im Jahr 2019 und 2020 im Inland und Ausland.....	166
Tabelle 99:	Verkehrsleistungen des Busverkehrs im Jahr 2019 und 2020 im Inland in TREMOD.....	166
Tabelle 100:	Verkehrsleistungen des Busverkehrs im Jahr 2021 im Inland in TREMOD	166
Tabelle 101:	Biomasse (Anteile gerundet) der Biokraftstoffe im Trendszenario	169
Tabelle 102:	THG-Emissionsfaktoren (g CO ₂ eq/MJ) der Biokraftstoffe und Biomasse im Trendszenario.....	170
Tabelle 103:	Anteile Biokraftstoffe und PtX im Trendszenario.....	171

Tabelle 104:	Anteil der Biomassenmixkategorien nach THG Quote des TREMOM Trendszenarios172
Tabelle 105:	Beispielrechnungen Erfüllung der THG-Quote im TREMOM- Trendszenario173

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
TREMOMM	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
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 2021 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 2021 neu berechnet. Weiterhin wurde das Trendszenario an die aktuellen Entwicklungen angepasst.

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 2021 (Bestand zum 1.1.2022 und Neuzulassungen im Jahr 2021) wurden für TREMOD aufbereitet.

Bei den meisten Fahrzeugkategorien stieg der Bestand weiter an. Gleichzeitig nahm der Anteil der Elektrofahrzeuge zu. So hat sich bei den Pkw der Bestand an batterieelektrischen und Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen gegenüber 2020 mehr als verdoppelt.

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 2021 fortgeschrieben. Gegenüber 2020 hat sich der Flottenwert der neuen Benzin-Pkw nur leicht verbessert, dagegen ist der Verbrauch der neuen Diesel-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 2021 aktualisiert. Gegenüber 2020 haben sich die Fahrleistungen der Pkw und Busse kaum geändert, bei Lkw sind sie leicht angestiegen.

Aktualisierung der Emissionsfaktoren

Seit Februar 2022 liegt die neue Version des HBEFA 4.2 vor. Die aktualisierten Emissionsfaktoren und Methoden wurden in TREMOD integriert.

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 2021 fortgeschrieben.

Gegenüber 2020 hat sich der Stromverbrauch des Straßenverkehrs aufgrund der zunehmenden Fahrzeuge mit Elektroantrieb mehr als verdoppelt. Der AdBlue-Verbrauch ist nach einem Rückgang 2020 wieder etwas angestiegen.

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. Die Änderungen im Jahr 2021 gegenüber 2020 waren uneinheitlich. Je nach Zusammensetzung des Fahrzeugparks gab es eine Zu- oder Abnahme der mittleren Emissionsfaktoren des Personennah- und Fernverkehrs, des Güterverkehrs und der Rangierleistungen.

Aktualisierung der Verkehrs- und Betriebsleistungen der Bahnen

Die Verkehrsdaten wurden bis zum Jahr 2021 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 2021 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. Die Kennzahlen der städtischen Bahnen beruhen im Wesentlichen auf der VDV-Statistik und Fortschreibungen der spezifischen Verbrauchsdaten auf Basis von Unternehmensbefragungen des VDV.

Aufgrund der Auswirkungen der Einschränkungen durch die Pandemie gab es im Personenverkehr im Jahr 2021 einen weiteren Rückgang der Verkehrsleistungen im Personennahverkehr gegenüber 2020. Der Personenfernverkehr ist leicht angestiegen. Beim Güterverkehr gab es einen deutlichen Anstieg der Verkehrsleistung.

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 2021 wurde eine Datenanfrage an das statistische Bundesamt gestellt und die Daten aus der Sonderauswertung für TREMOD aufbereitet. Bei der Binnenschifffahrt kam es 2021 zu einem leichten Anstieg der Verkehrsleistung gegenüber 2020.

Aktualisierung Flugverkehr

In der diesjährigen Aktualisierung wurden die Aktivitätsdaten des Jahres 2021 integriert. Außerdem wurden einige neue Flugzeugtypen ergänzt. Beim Flugverkehr war der Rückgang pandemiebedingt besonders hoch: Die Verkehrsleistungen stiegen nach dem starken Einbruch 2020 wieder etwas an.

Aktualisierung Trendszenario

Das Szenario baut auf den Ergebnissen der „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2022“ des BMDV auf. Dies betrifft vor allem die Entwicklung der sozio-ökonomischen Rahmenbedingung sowie die Entwicklung der Verkehrs- und Betriebsleistungen.

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

- ▶ CO₂-Grenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge sowie das „Verbrennerverbot“
- ▶ CO₂-Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge
- ▶ Erneuerbare-Energien-Richtlinie bis 2030
- ▶ Gesetzes zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote

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.

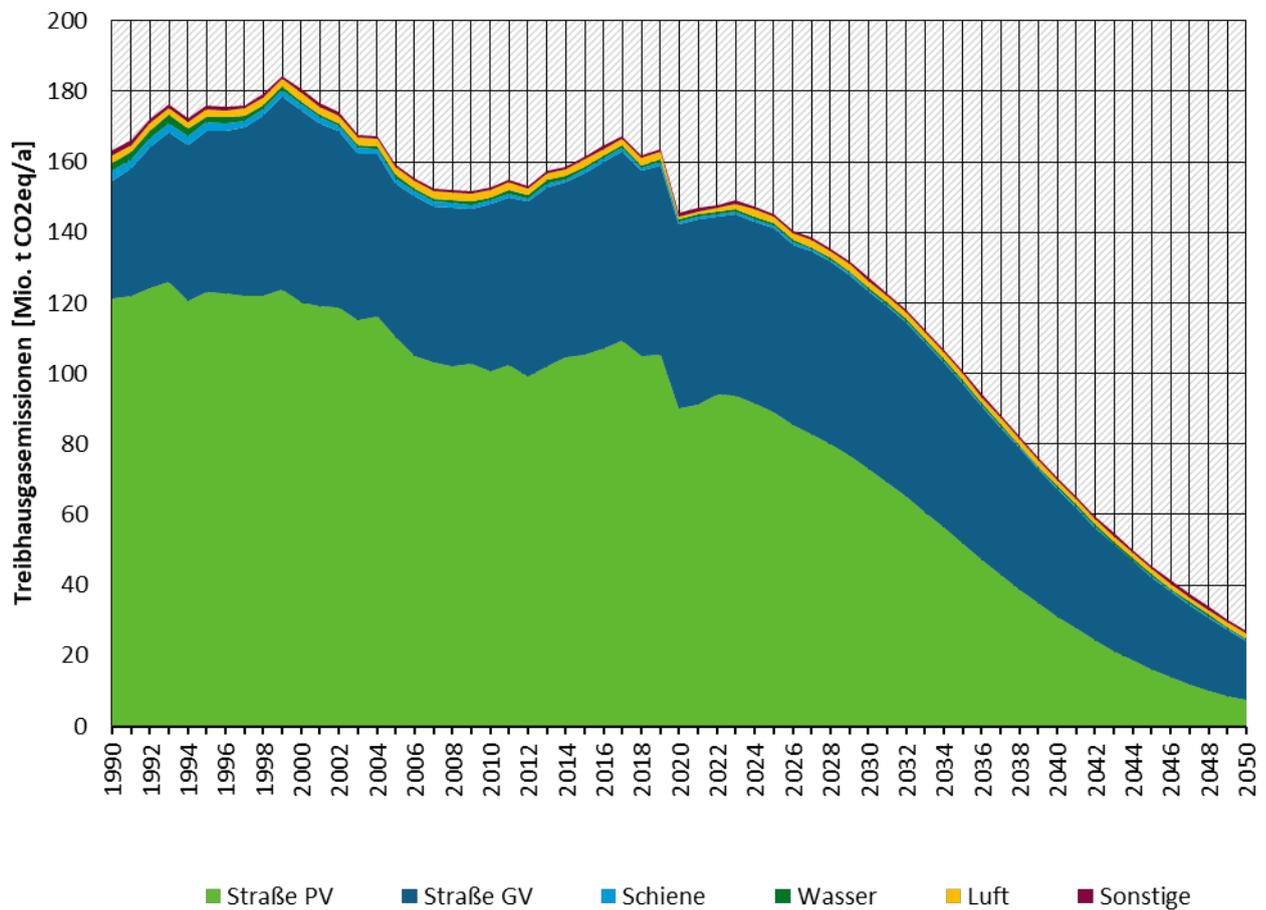
Ergebnisse

Mit den aktualisierten Daten und Annahmen im Trendszenario erfolgt eine schnellere Durchdringung der Fahrzeugflotten mit Elektrofahrzeugen als bisher. Aus verkehrlicher Sicht relevant ist das geringere Wachstum des MIV und das stärkere Wachstum des Straßengüterverkehrs der „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2022“ als bisher angenommen.

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 50 % 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 6.43 vom 31.03.2023; Emissionsübersichten nach Sektoren des Bundesklimaschutzgesetzes 1990 - 2022; Stand: 15.03.2023; ab 2023 Trendszenario

Summary

Within the framework of the current project, the current data for the calculation of transport emissions up to the reference year 2021 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 2021 were then recalculated. Furthermore, the trend scenario was updated.

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 2021 (stock on 1.1.2022 and new registrations in 2021) 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 stock of battery-electric and plug-in hybrid vehicles more than doubled compared to 2020.

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 2021 on the basis of the KBA's CO₂ monitoring. Compared to 2020, the fleet value of new petrol passenger cars has improved only slightly, whereas the consumption of new diesel 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 2021. Compared to 2020, the mileage of passenger cars and buses has hardly changed, while it has increased slightly for trucks.

Updating the emission factors

The new version of HBEFA 4.2 has been available since February 2022. The updated emission factors and methods have been integrated into TREMOD.

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 2021.

Compared to 2020, 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 after a decline in 2020.

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. The changes in 2021 compared to 2020 were mixed. Depending on the composition of the vehicle fleet, there was an increase or decrease in the average emission factors of local and long-distance passenger transport, freight transport and shunting services.

Updating the transport and operating services of Railways

Traffic data have been updated up to 2021. 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 2020, 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. The key figures for municipal railways are essentially based on VDV statistics and updates of specific consumption data on the basis of VDV company surveys.

Due to the effects of the restrictions caused by the pandemic, there was a further decrease in transport services in passenger transport in 2021 compared to 2020, although the operating services were hardly reduced. In freight transport, there was a significant increase in transport performance.

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 2021, 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 slight increase in transport performance in 2021 compared to 2020.

Updating air traffic

In this year's update, the activity data of the year 2021. In addition, some new aircraft types were added. The decline in air traffic was particularly high due to the pandemic: traffic performance increased again somewhat after the sharp drop in 2020.

Updating trend scenario

The scenario is based on the results of the "Floating Long-Range Traffic Forecast 2022" of the BMDV. 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.

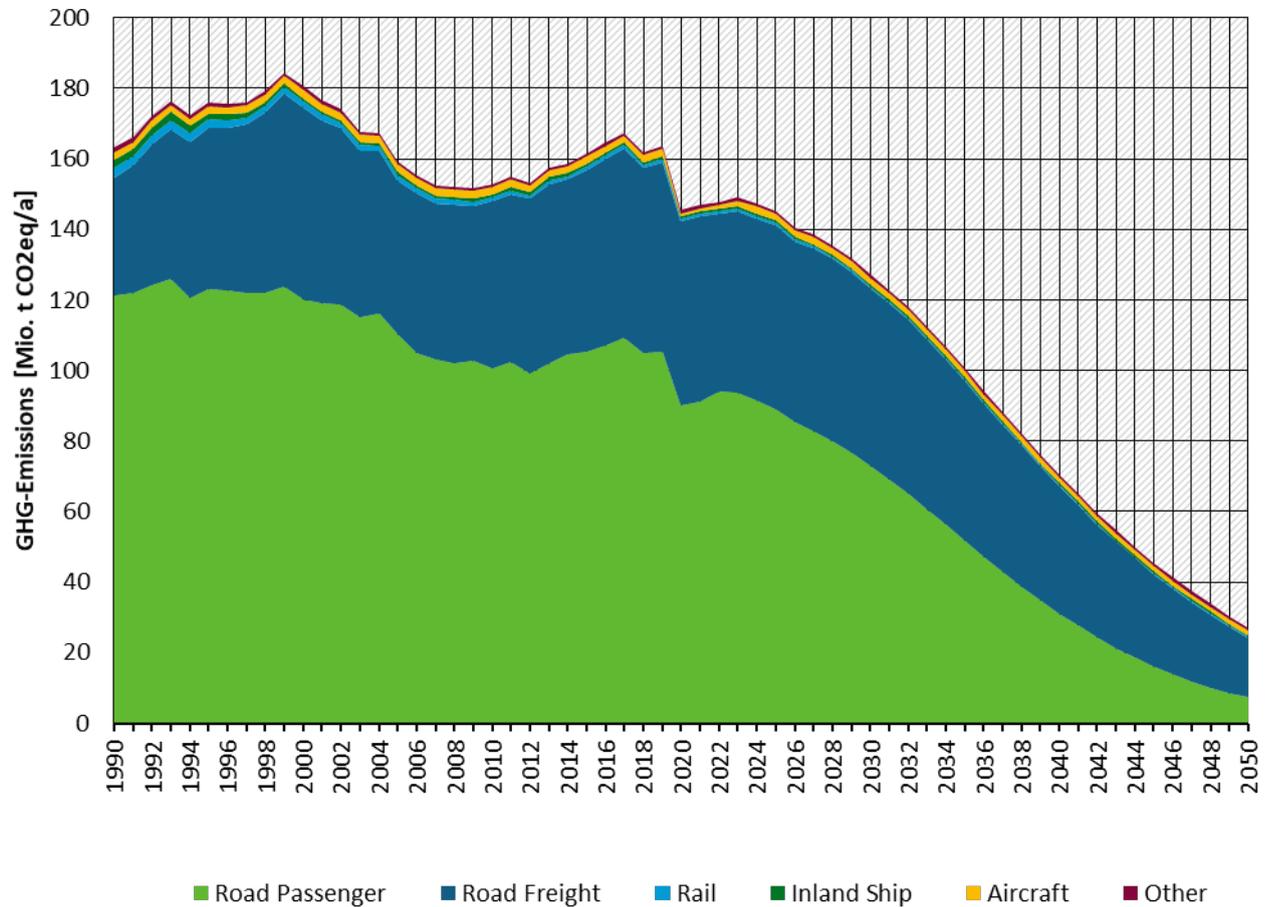
Results

With the updated data and assumptions in the trend scenario, there is a faster penetration of vehicle fleets with electric vehicles than before. From a transport perspective, the lower growth of private transport and the stronger growth of road freight transport in the "Floating Long-Range Traffic Forecast 2022" than previously assumed are relevant.

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 50 % 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 6.43 of 31.03.2023; emission overviews by sector of the Federal Climate Protection Act 1990 - 2022; as of 15.03.2023; from 2023 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	Bio-ethanol	Bio-diesel	CNG/ 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	CNG	LPG	LNG	Bioethanol	Biodiesel	Flugbenzin	Kerosin
1990	43,543	42,705	46,500	45,887	50,000	26,917	37,242	43,543	42,705
1991	43,543	42,705	46,500	45,887	50,000	26,917	37,242	43,543	42,705
1992	43,543	42,705	46,500	45,887	50,000	26,917	37,242	43,543	42,705
1993	43,543	42,960	46,500	45,987	50,000	26,917	37,242	43,543	43,000
1994	43,543	42,960	46,500	46,041	50,000	26,917	37,242	43,543	43,000
1995	43,543	42,960	46,500	46,028	50,000	26,917	37,242	43,543	43,000
1996	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	43,000
1997	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	43,000

Jahr	Benzin	Diesel	CNG	LPG	LNG	Bioethanol	Biodiesel	Flugbenzin	Kerosin
1998	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	43,000
1999	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	43,000
2000	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	43,000
2001	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	43,000
2002	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	43,000
2003	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	43,000
2004	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2005	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2006	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2007	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2008	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2009	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2010	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2011	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2012	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2013	43,543	42,960	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2014	43,543	42,649	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2015	42,280	42,694	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2016	42,280	42,648	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2017	42,280	42,648	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2018	42,280	42,648	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2019	42,280	42,648	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2020	42,280	42,648	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800
2021	42,280	42,648	46,500	46,598	50,000	26,917	37,242	43,543	42,800

Quellen: AG Energiebilanzen (Benzin, Diesel, Kerosin, LPG, Biodiesel und Bioethanol); Erdgas: HBEFA 3.3; LNG: vorläufige Schätzwerte

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-Emissionen der Biokraftstoffe werden ebenfalls berechnet. Zusätzlich werden direkte Emissionen als „CO₂-fossil“ ausgewiesen. Hier sind für Biokraftstoffe die CO₂-Emissionen auf Null gesetzt.

Die direkten CO₂-Emissionsfaktoren für die Kraftstoffe und Gase wurden im Jahr 2021 vom Umweltbundesamt aktualisiert und gehen aus der folgenden Tabelle hervor.

Tabelle 4: Direkte CO₂-Emissionsfaktoren für Kraftstoffe und Gase

In kg/TJ

	Benzin	Diesel	Ethanol	Biodiesel	Flüssig- gas	Erdgas	Kerosin	Flug- benzin
1990	73.069	74.027			65.559		73.256	70.000
1991	73.061	74.027			65.557		73.256	70.000
1992	73.057	74.027			65.543		73.256	70.000
1993	73.056	74.027			65.368		73.256	70.000
1994	73.069	74.027			65.326		73.256	70.000
1995	73.075	74.027		70.800	65.334		73.256	70.000
1996	73.076	74.027		70.800	65.212		73.256	70.000
1997	73.073	74.027		70.800	65.205		73.256	70.000
1998	73.079	74.027		70.800	65.230		73.256	70.000
1999	73.086	74.027		70.800	64.041		73.256	70.000
2000	73.094	74.027		70.800	64.404		73.256	70.000
2001	73.095	74.027		70.800	64.505		73.256	70.000

	Benzin	Diesel	Ethanol	Biodiesel	Flüssig- gas	Erdgas	Kerosin	Flug- benzin
2002	73.095	74.027		70.800	64.376		73.256	70.000
2003	73.094	74.027		70.800	64.955		73.256	70.000
2004	73.099	74.027	71.607	70.800	65.262		73.256	70.000
2005	73.103	74.027	71.607	70.800	65.295	55.869	73.256	70.000
2006	73.106	74.027	71.607	70.800	65.361	55.869	73.256	70.000
2007	73.107	74.027	71.607	70.800	66.608	55.853	73.256	70.000
2008	73.116	74.027	71.607	70.800	65.225	55.868	73.256	70.000
2009	73.119	74.027	71.607	70.800	65.254	55.932	73.256	70.000
2010	73.119	74.027	71.607	70.800	65.330	55.928	73.256	70.000
2011	73.025	74.027	71.607	70.800	65.395	55.934	73.256	70.000
2012	73.088	74.027	71.607	70.800	65.399	55.917	73.256	70.000
2013	73.091	74.027	71.607	70.800	65.413	55.944	73.256	70.000
2014	73.091	74.027	71.607	70.800	65.461	55.936	73.256	70.000
2015	75.287	74.027	71.607	70.800	66.346	55.889	73.256	70.000
2016	75.285	74.027	71.607	70.800	66.334	55.840	73.256	70.000
2017	75.285	74.027	71.607	70.800	66.334	55.827	73.256	70.000
2018	75.285	74.027	71.607	70.800	66.334	55.718	73.256	70.000
2019	75.284	74.027	71.607	70.800	66.334	55.749	73.256	70.000
2020	74.952	74.027	71.607	70.800	66.334	55.826	73.256	70.000
2021	74.950	74.027	71.607	70.800	66.334	55.826	73.256	70.000

Anmerkungen: Änderung bei Benzin ab 2015 aufgrund der Änderung des Heizwerts durch die AG Energiebilanzen
Quelle: Umweltbundesamt 2022

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

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 aktuelle und auch in den nächsten Jahren relevante konventionellen Kraftstoffe für den Straßenverkehr sind Benzin, Diesel, CNG, LNG und Wasserstoff aus Erdgasreformierung. Die Emissionsfaktoren für diese Kraftstoffe wurden auf Grundlage der im Vorhaben „Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr“ (ifeu in Bearbeitung) ermittelten Daten abgeleitet und in

TREMOM übernommen. Dabei wurden auch Emissionsfaktoren für die Luftschadstoffe, die nicht Bestandteil des genannten Vorhabens sind, abgeleitet.

Die Emissionsfaktoren sind repräsentativ für Deutschland im Jahr 2020. Eine aktualisierte Zeitreihe für vergangene und zukünftige Jahre, die auf der gleichen Datengrundlage und Methodik beruht, liegt nicht vor. In der aktuellen TREMOM-Version 6.43 werden die neuen Daten ab dem Bezugsjahr 2019 eingesetzt. Für alle Jahre vor 2019 werden die bisherigen Emissionsfaktoren weiterverwendet. Die aktuellen Emissionsfaktoren weichen z.T. deutlich von den bisherigen Werten ab und führen daher zu einem Sprung in der Zeitreihe ab 2019 gegenüber den Vorjahren.

1.4.2 Strom

In TREMOM werden die Emissionsfaktoren für die Strombereitstellung des Umweltbundesamtes verwendet (Lauf, Thomas et al. 2022). Die aktuellen Werte bis 2021 werden übernommen, wobei die Werte für 2020 und 2021 noch als vorläufig bzw. geschätzt markiert sind.

Für die Ableitung zukünftiger Strommische wird auf Daten aus aktuellen Szenarien zur Stromerzeugung in Deutschland zurückgegriffen. Da die Ziele zur Dekarbonisierung des Stromsektors gegenüber der letzten TREMOM-Version nicht geändert wurden, werden die bisherigen Annahmen beibehalten. Diese werden in den folgenden Abschnitten nochmals dargestellt.

Für die Jahre bis 2035 werden die Annahmen des Klimaschutzprogramm 2030 Szenarios aus (Harthan et al. 2020) übernommen. Hier wird eine mögliche Entwicklung beim Strommix abgeleitet, welche die deutschen Ziele für den Anteil erneuerbaren Stroms und den beschlossenen Kohleausstieg bis 2038 enthält. Für die Auswirkungen der kürzlich getroffenen Vereinbarung zum vorzeitigen Kohleausstieg in Nordrhein-Westfalen bis 2030 liegen keine Informationen vor, die hier berücksichtigt werden können.

Für die Jahre nach 2035 wird wie in der Vorversion die im Projekt "Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau Erneuerbarer Energien in Deutschland" (BMW 2017) abgeleiteten Szenarien verwendet, mit der ebenfalls im Vorjahr vorgenommenen Anpassung, dass die im Szenario verbleibenden Anteile der Stromerzeugung aus Stein- und Braunkohle auf die anderen Erzeugungsarten umverteilt werden, da ein vollständiger Kohleausstieg bis 2038 vorausgesetzt wird.

Tabelle 6: Stromerzeugung im TREMOM-Trendszenario

	2025	2030	2035	2050
Nuklear	0%	0%	0%	0%
Kohle	27,7%	19,2%	9,6%	0%
Öl	0,4%	0,4%	0,4%	0,1%
Gas	15,3%	16,6%	15,8%	7,1%
Biomasse	7,6%	7,0%	7,1%	5,4%
Wasser	3,6%	3,6%	3,7%	3,8%
Wind	30,4%	34,8%	41,8%	70,4%
Solar	10,5%	14,2%	17,3%	13,3%
Summe Erneuerbare	52%	60%	70%	93%

Quelle: Langfristszenarien BMW (BMW, 2017), KSP (Jan 2020), eigene Darstellung nach ifeu

Die zukünftigen Emissionsfaktoren ab 2025 wurden ebenfalls aus dem Vorjahr übernommen. Zwischen 2021 und 2025 und nachfolgend 2030, 2035 und 2050 wurden die Werte linear interpoliert. Vereinfacht wurde die relative Entwicklung der THG-Emissionen ab 2021 für alle Emissionskomponenten übernommen.

Die folgende Tabelle zeigt die so berechneten mittleren THG-Emissionsfaktoren für 2019 bis 2021 und für das TREMOD-Trendszenario.

Tabelle 7: Berechnete Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung in g CO₂eq/ kWh in verschiedenen Szenarien und UBA-Realwerte als Grundlage für das TREMOD-Trendszenario

	KSPR (Jan 2020)	Basisszenario DE (ohne Kohle)	UBA DE Real	TREMODO Trendszenario
2019			474	474
2020	512		438	438
2021			485	485
2025	446			446
2030	352			352
2035	234			234
2050		56		56

Quelle: (Icha und Kuhs 2020), ergänzt um weitere Angaben des Umweltbundesamts, sowie eigene Berechnungen auf Basis von Langfristszenarien BMWi (BMWi, 2017) sowie KSPR (Jan 2020)

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). In diesem Vorhaben wurden die Zusammensetzungen der Kraftstoffherkunft je Kraftstoff aktualisiert und im Trendszenario angepasst. Hierbei wird die Einhaltung der Mindestkriterien überprüft, die durch das Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote (Bundesrat 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 im Anhang B dargestellt.

1.4.4 Synthetische Kraftstoffe

In diesem Vorhaben wurden PtX-Kraftstoffe als eigenständige Energieträger in die TREMOD Struktur integriert. Da die genauen Herstellungspfade von PtX-Kraftstoffen noch nicht bekannt sind und verschiedene Forschungsvorhaben an der Ableitung solcher Faktoren arbeiten, werden in die aktuelle Version keine Emissionsfaktoren integriert. Die in TREMOD angelegten Strukturen sind mit den HBEFA 4.2 kompatibel.

Folgende Strukturen werden angelegt:

- ▶ Definition der Kraftstoffe und Zuordnung zu den Basiskraftstoffen (Benzin, Diesel, CNG, Kerosin): Es wird angenommen, dass die synthetischen Kraftstoffe den Basiskraftstoffen beige-mixt werden.
- ▶ Anteil der synthetischen Kraftstoffe an den Basiskraftstoffen: Für jeden Verkehrsträger können Zeitreihen je Kraftstoffart definiert werden, die den Anteil der synthetischen Kraftstoffe am Basiskraftstoff angeben. Aktuell sind im Trendszenario für den Straßenverkehr die synthetischen Kraftstoffe zu den Basiskraftstoffen Benzin, Diesel, und CNG definiert. Der Anteil der synthetischen Kraftstoffe ist 0% in der gesamten Zeitreihe
- ▶ Es werden die Strukturen für die WTT-Emissionsfaktoren der definierten Kraftstoffe angelegt.
- ▶ Für die kraftstoffabhängigen Emissionsfaktoren (CO₂, SO₂) werden ebenso die Strukturen für alle synthetischen Kraftstoffe angelegt.
- ▶ Für die direkten Abgasemissionen werden keine separaten Emissionsfaktoren definiert, da dies momentan in der TREMOD-Struktur nicht vorgesehen ist. Die Emissionsfaktoren beziehen sich auf den Basiskraftstoff und sind für alle Kraftstoffbestandteile (konventionell, bio, synthetisch) gleich.

Tabelle 8 zeigt die synthetischen Kraftstoffe, die in TREMOD angelegt wurden und die in Szenarien verwendet werden können, wenn geeignete Emissionsfaktoren integriert werden.

Tabelle 8: Definition der Synthetischen Kraftstoffe in TREMOD

IDEnergie	Energie	Beschreibung	Basisenergie
42	petrol PtX	Power-to-X petrol	Benzin
43	diesel PtX	Power-to-X diesel	Diesel
44	Gas PtX	Power-to-X gas	CNG
45	kerosene PtX	kerosene PtX	Kerosin

Quelle: HBEFA 4.2

2 Aktualisierung der Zeitreihe 1990-2021

2.1 Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr

Für die Aktualisierung der Verkehrsmengen bis 2021 lagen mit Stand 10. September 2022 folgende Daten vor, die für die Aktualisierung der Fahr- und Verkehrsleistungen bis 2021 verwendet wurden:

- ▶ Verkehr in Zahlen 2021/2022:
Fahr- und Verkehrsleistungsdaten des MIV bis 2019, des Straßengüterverkehrs und Eisenbahngüterverkehrs bis 2020
- ▶ Destatis: Güterverkehr Beförderungsmenge und Beförderungsleistung nach Verkehrsträgern, Stand 14.09.2021. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Tabellen/gueterbefoerderung-lr.html>
Güterverkehrsleistung Straßenverkehr und Binnenschifffahrt 2021
- ▶ Destatis Genesis Online: Abfrage der Verkehrs- und Fahrleistungen des Bus- und Straßenbahnverkehrs bis 2020 (Tabellen 46181-0001, 46181-0002 und 46181-0010) im September 2022; <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>
- ▶ Destatis Genesis Online: Abfrage der Verkehrsleistungen des Liniennahverkehrs bis 2021 (Tabelle 46181-0005) im September 2022; <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>
- ▶ Sonderauswertung von Flixbus für den Fernlinienverkehr (Flixbus 2022)
- ▶ DB AG: Kennzahlen zum Eisenbahnverkehr der DB 2021 (DB AG 2022) Verkehrsleistungen, Betriebsleistungen und Auslastung nach Traktionsarten der DB AG
- ▶ Sonderabfrage DESTATIS zur Binnenschifffahrt 2021
- ▶ Sonderabfrage DESTATIS zum Flugverkehr 2021

Dabei wurden einzelne Werte z.T. rückwirkend korrigiert, so dass im Detail Unterschiede zu TREMOD 6.21 auftreten (siehe Details in den Kapiteln zu den einzelnen Verkehrsträgern). Verschiedene Werte für 2021 wurden vorab mit DLR und Intraplan abgestimmt, um die Abweichungen von den zeitgleich erstellten Datensätzen für „Verkehr in Zahlen“ sowie die „Gleitende Mittelfristprognose“ gering zu halten. Beim MIV sind die Berechnungsansätze von ifeu, DLR und Intraplan für 2020 und 2021 unterschiedlich. Details hierzu finden sich im Kapitel 2.2.2).

Die Verkehrsleistungen des Busverkehrs wurden nach der Fertigstellung des Inventars überarbeitet. Daher enthält die TREMOD-Version 6.43 zum Teil gegenüber der Version 6.41 geänderte Fahr- und Verkehrsleistungen für den Busverkehr. Die Änderungen sind in Tabelle 9 berücksichtigt. Das Vorgehen wird im Anhang A beschrieben.

Tabelle 9 fasst die Verkehrsleistungsentwicklung von 2010-2021 für den Straßen-, Schienen-, Binnenschiffs- und Flugverkehr zusammen (Stand September 2022).

Tabelle 9: Verkehrsleistungsentwicklung 2010-2021

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

	2010	2014	2019	2020	2021	2010-2019	2019-2020	2019-2021
Personenverkehr	1.082,8	1.099,2	1.127,8	891,9	883,4	4,2%	-20,9%	-21,7%
davon:								
Straße	982,6	993,0	1.010,1	821,4	813,3	2,8%	-18,7%	-19,5%
MIV	893,8	904,4	917,4	782,2	776,6	2,6%	-14,7%	-15,3%
Bus	89,9	90,1	94,1	40,3	37,5	4,7%	-57,2%	-60,2%
Fernlinienbus	0,0	4,0	4,1	1,3	0,9		-69,6%	-78,5%
Nahlinienbus	38,9	38,6	38,3	29,3	27,8	-1,6%	-23,5%	-27,4%
Sonst. Busse*	50,9	47,4	51,6	9,7	8,8	1,4%	-81,1%	-83,0%
Schiene	100,2	106,2	117,7	70,5	70,2	17%	-40,1%	-40,4%
PNV DB	41,4	43,6	41,6	23,9	21,4	0,6%	-42,6%	-48,6%
PNV NE	6,6	9,9	14,5	11,5	13,0	120%	-20,7%	-10,2%
PFV	36,0	35,9	43,9	23,5	24,7	22%	-46,6%	-43,9%
SSU-Bahnen	16,2	16,8	17,7	11,7	11,1	9,2%	-33,7%	-37,0%
Güterverkehr	610,7	626,0	678,7	653,5	683,6	11%	-3,7%	0,7%
davon:								
Straße	440,6	451,9	498,6	487,4	505,6	13%	-2,2%	1,4%
Schiene	107,9	115,0	129,2	119,8	129,9	20%	-7,3%	0,5%
Schiene DB	80,4	74,8	60,7	56,2	60,3	-24%	-7,3%	-0,6%
Schiene NE	27,5	40,2	68,5	63,5	69,5	149%	-7,2%	1,5%
Binnenschiff	62,3	59,1	50,9	46,3	48,2	-18%	-9,0%	-5,3%
Flugverkehr								
Personenverkehr	194,3	213,3	262,7	67,0	79,3	35%	-74,5%	-69,8%
davon:								
National	10,8	10,1	10,6	3,1	2,3	-1,8%	-71,1%	-78,2%
International abgehend	183,5	203,2	252,1	63,9	76,9	37%	-74,7%	-69,5%
Güterverkehr	10,8	11,3	12,2	11,1	13,4	13%	-9,3%	9,3%
davon:								
National	0,042	0,042	0,0497	0,0472	0,0512	19%	-5,0%	3,1%
International abgehend	10,7	11,3	12,2	11,0	13,3	13%	-9,3%	9,4%

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

Quellen: (DLR und DIW 2021), 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 10.

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 10: Berücksichtigte Antriebsarten pro Fahrzeugkategorie bis zum Bezugsjahr 2020

Fahrzeugkategorie	Otto	Diesel	Hybrid	CNG/LNG	LPG	BEV	PHEV (D/B)
KKR	≥1960					≥2012	
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 (KBA 2023a).

Bei den Pkw nahm der Anteil der Dieselfahrzeuge zwischen 2000 und 2018 von 14% auf 33% zu, danach ging der Anteil bis 2021 zurück auf 31 %. Die alternativen Antriebe (CNG, LPG, BEV und PHEV) machten 2021 etwa 2,7 % des Pkw-Bestands aus.

Tabelle 11: Entwicklung des Pkw-Bestands nach Antriebsart 2000-2021

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%

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

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 2021 ca. 1,6 % der LNF-Flotte ausmachten.

Tabelle 12: Entwicklung des LNF-Bestands von 2000-2021 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%

Jahr	Anzahl	Otto	Diesel	CNG	BEV+PHEV
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%

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. 0,9% im Jahr 2021. Bei den kleineren Lkw sind dies vor allem batterieelektrische, bei den Sattelzügen hingegen LNG-Fahrzeuge.

Tabelle 13: Entwicklung des SNF-Bestands nach Antrieben 2000-2021

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%

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 geschätzt wird, die von der Kategorie „Sonstige 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 14 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. Bei den Fernlinienbussen kam es ab 2012 zunächst zu einem Anstieg, seit 2014 ist ein leichter Rückgang der Bestände zu beobachten. Reise- und Fernlinienbusse werden bisher fast ausschließlich mit Dieselmotor angetrieben.

Bei den Linienbussen nahm der Bestand in derselben Zeitspanne zu. Diese werden ebenfalls überwiegend mit Dieselmotor angetrieben. Alternative Antriebe waren hierbei vor allem CNG mit einem Anteil von 3% ab 2006, der jedoch bis 2021 wieder auf 1,5 % zurückging. Deutlich gestiegen in den letzten Jahren ist hingegen der Anteil der Hybrid- und Elektro-Busse.

Tabelle 14: Entwicklung des Busbestands von 2000-2021 insgesamt und Anteil der Linienbusse nach Antriebsart

Anzahl Fahrzeuge und Anteile je Fahrzeug- und Antriebsart

Jahr	Fernlinienbusse	Sonstige Reisebusse	Linienbus Gesamt	davon Dieselmotor	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%		

Jahr	Fernlinienbusse	Sonstige Reisebusse	Linienbus Gesamt	davon Diesel	davon CNG	davon Hybrid	davon BEV
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%
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%

Anmerkung: Ab 2012 geänderte Aufteilung

Quelle: KBA, eigene Annahmen

Der Bestand der vom KBA registrierten Krafträder hat zwischen 2000 und 2021 zugenommen. Diese waren im Jahr 2021 überwiegend benzinbetrieben, wobei angenommen wird, dass der Anteil der 2-Takter kontinuierlich abnahm. Nur ca. 0,4 % 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 2021 vom Zweirad-Industrie-Verband (ZIV 2022) auf 8,5 Mio. Fahrzeuge geschätzt.

Tabelle 15: Entwicklung des KR-, KKR- und Pedelec-Bestands nach Antrieben 2000-2021

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

Jahr	Anzahl KR	davon Otto 2-T	davon Otto 4-T	davon BEV	Anzahl KKR	davon Otto 2-T	davon BEV	Anzahl Pedelecs
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
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

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 verschiedene neue Quellen und neue Methodiken erarbeitet. Dementsprechend ist in diesem Kapitel die komplette Methodik der Berechnung der Fahrleistungen vor 2020 und nach 2020 beschrieben. 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 (siehe Kapitel 2.2.2.3).

2.2.2.1 Personenverkehr

2.2.2.1.1 Methodik der Ableitung der Fahrleistung ab 2020 und Ergebnisse 2021

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“ (DLR und DIW 2021) verwendet. In der Fortschreibung von Verkehr in Kilometer für 2020 (KBA 2023b) 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 Fahrleistungseckwerte 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 neu verfügbare Quelle: das Verkehrsbarometer (BASt 2023). Die jährliche Änderungsrate 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 16). 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 weiterhin verwendet.

Tabelle 16: Jährliche Änderungsrate der DTV laut Verkehrsbarometer

	FzKat	Autobahn	Bundesstraße
2021/2020	KR	-3,5%	-11,1%
	Pkw	+0,4%	-0,9%
2020/2019	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 2021 war bei den Pkw auf den Bundesstraßen ein leichter Rückgang der-Fahrleistung ggü.2020 zu beobachten, auf Autobahnen, ein leichter Zuwachs von 0,4%, nach einem deutlichen Rückgang aufgrund des Coronaeffekts im Jahr davor. Die Fahrleistung der Kräder ging 2021 sowohl auf Autobahnen als auch auf Bundesstraßen zurück, während sie 2020 gegenüber2019 auf Autobahnen deutlich abgenommen hatte, auf Bundesstraßen jedoch angestiegen war.

Da bisher keine zuverlässige Quelle für die restlichen Straßenkategorien herangezogen werden kann, wird das Wachstum der Fahrleistung auf diesen Straßen an das Wachstum auf Bundesstraßen je Fahrzeugkategorie nach dem Verkehrsbarometer angelehnt. Aktuelle Analysen zur Verwendung der automatischen Straßenzähler der Bundesländer laufen. Der Stand dieser Untersuchung ist in Kapitel 2.2.2.3 dargestellt.

Die Ergebnisse der MIV Fahrleistungen 2019 – 2021 sind in Tabelle 17 zusammengefasst. Die Fahrleistungen gehen 2021 gegenüber 2020 zurück, wobei die Pkw Fahrleistung, die ca. 97% der MIV Fahrleistungen ausmachen, einen sehr geringen Rückgang von -0,5% aufweist.

Tabelle 17: Fahrleistungen des MIV in TREMOD 2019-2021

FzKat	Fahrleistung 2019 (Mio.km)	Fahrleistung 2020 (Mio.km)	Fahrleistung 2021 (Mio.km)	Änderungsrate 2020-2021 (%)
KKR	4.922	5.039	4.479	-11%
KR	9.920	9.946	8.928	-10%
Pkw	644.815	548.109	545.266	-0,5%
U-ekfzl	1.014	862	861	-0,1%

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 2020 aus Destatis (Destatis 2021) übernommen, die Berechnungsmethodik der restlichen Fahrleistung d.h. der sonstige Reisebusse in 2020 ist in Anhang A ausführlich beschrieben. Leider erscheint die Publikation für das aktuelle Jahr erst nach der Frist für die Berichterstattung und kann nur nachträglich einbezogen werden. Dementsprechend sind die Werte für Busse 2021 wie folgt abgeleitet:

- ▶ Für *Fernlinienbusse* wurden Fahrleistungsdaten von Flixbus analysiert und in einem Fachgespräch besprochen (siehe Anhang A). Der abgeleitete Rückgang von -29% ggü. 2020 wurde für alle Straßenkategorien übernommen.
- ▶ Für *Linienbusse* wurde angenommen, dass die Fahrleistung der Linienbusse gegenüber 2020 unverändert ist.
- ▶ Für *Reisebusse* wurde die Fahrleistung 2021 um 10% niedriger als die von 2020 geschätzt (gleich für alle Straßenkategorien).

Insgesamt gehen die Busfahrleistungen 2021 ggü. 2020 mit -1,9% leicht zurück (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18: Busfahrleistung in TREMOD

FzKat	Fahrleistung 2019 (Mio.km)	Fahrleistung 2020 (Mio.km)	Fahrleistung 2021 (Mio.km)	Änderungsrate 2020-2021 (%)
SRBus	1.896	405	365	-10%
FLBus	128	49	34	-29%
LBus	2.593	2.491	2.491	0%
Summe	4.617	2.944	2.889	-1,9%

Quellen: KBA, BAST, eigene Berechnungen

Die für TREMOD abgeleiteten Fahrleistungen der Pkw unterscheiden sich 2020 und 2021 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 (siehe Anhang A).

2.2.2.1.2 Methodik der Ableitung der Fahrleistung des Personenverkehrs bis 2019

Bis 2019 wird die Fahrleistung der Pkw, Krafträder und Busse aus Verkehr in Kilometern (KBA 2023b) entnommen, in dem die durchschnittliche jährliche Fahrleistung von KBA-ViK je Fahrzeugkategorie mit dem KBA Bestand von TREMOD multipliziert ist. Auf Basis der Ergebnisse der FLE 2014 (Bäumer et al. 2016) wurde angenommen, dass Inländerfahrleistungen (aus KBA-ViK) der Pkw, Kräder und Busse gleich der Inlandsfahrleistung in TREMOD sind.

Die Fahrleistung des Personenverkehrs wird auf Bundesautobahn und Bundesstraßen anhand der automatischen Straßenverkehrszählungen der BAST abgeleitet. Diese Quelle liefert die Fahrleistung des Verkehrs und die DTV des Leichtverkehrs (sowie des Schwerverkehrs) auf Autobahnen und Bundesstraßen. Die resultierende Fahrleistung des Leichtverkehrs wird zwischen den

Fahrzeugkategorien KR, Pkw und LNF auf Basis der alle fünf Jahre erhobenen manuellen Straßenverkehrszählungen der BASt unterteilt, die des Schwerverkehrs zwischen Bus, Lkw und Lastzügen. Die letzte Erhebung wurde 2015 durchgeführt, für die aktuelle Erhebung 2021 liegen bisher keine Ergebnisse vor. Die Entwicklung 2016-2019 je Fahrzeugkategorie wurde deswegen wie folgt angepasst:

- ▶ Für Pkw und Kräder ist auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen die Verteilung vom Leichtverkehr nach Fahrzeugkategorien aus dem Mittelwert der Jahre 2001-2015 abgeleitet.
- ▶ Busse sind im Schwerverkehr enthalten und für Bundesautobahn und Bundesstraßen wie Pkw und Kräder abgeleitet: der jährliche Anteil der Busse am Schwerverkehr wird anhand des Mittelwerts der letzten 14 Jahren berechnet (2001-2015) – das Ergebnis ist in Tabelle 23 dargestellt.

Auf Land, Kreis- und Gemeindestraßen werden die Fahrleistungen der Pkw, KR (für Leichtverkehr) und Busse (für Schwerverkehr) anhand der jährlichen Wachstumsrate der letzten 14 Jahren abgeleitet (2001-2014).

Auf Innerortstraßen sind die Fahrleistungen der Pkw, KR und Busse ein Berechnungsergebnis der Differenz zwischen der Summe der anderen Straßenkategorien und der gesamten Fahrleistung aus Verkehr in Kilometern (KBA-ViK).

Die Fahrleistung der KKR wurde 2014 mit der FLE 2014 (Bäumer et al. 2016) aktualisiert, danach konstant gelassen. Auf die jeweiligen Straßenkategorien ist die Fahrleistung der Kräder unterteilt zwischen KKR und KR. Diese Verteilung wurde aus der FLE 2014 je Straßenkategorie abgeleitet und bis 2019 konstant gelassen.

2.2.2.2 Güterverkehr

2.2.2.2.1 Methodik der Ableitung der Fahrleistung ab 2019 und Ergebnisse 2021

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

Ab 2019 wird die Mautstatistik als Hauptquelle für die Fahrleistung des Schwergüterverkehrs auf Autobahnen und Bundesstraßen verwendet. Die Mautfahrleistung der mautpflichtigen Fahrzeuge kann sowohl automatisch als auch manuell erfasst werden. Die automatische Mauterhebung basiert auf einer Kombination der Mobilfunktechnologie (GSM) mit dem Satellitenortungssystem GPS basierend auf einer sogenannten On-Board Unit (OBU). Die manuelle Mauterhebung findet am Mautstellen-Terminal oder per-Internet statt und eignet sich vor allem für Lkw-Fahrer und Transportunternehmen, die selten auf mautpflichtigen Straßen fahren¹. Die aus beiden Verfahren abgeleiteten Fahrleistungen sind dementsprechend präzise und gelten hier als Referenz. 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 den Fahrleistungen 2019 in (KBA 2023b)). Die Wachstumsraten der Fahrleistung der Mautstatistik von 2019 bis 2021 ist in Tabelle 19 dargestellt.

¹ Methodische Beschreibung der Mautstatistik abrufbar unter: https://www.balm.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Lkw-Maut/Meth_Erlaeuterung_Maut_deutsch.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Tabelle 19: Änderung der Fahrleistung auf Autobahn laut Mautstatistik

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

In der Mautstatistik ist der Wachstumstrend des Güterverkehrs 2021 ggü. 2020 deutlich zu erkennen, vor allem auf Autobahn mit 4,4% Wachstum. Im Unterschied zu 2020/2019 hat die Coronakrise in 2021/2020 keinen Bremseffekt mehr. Damit erreichen 2021 die Fahrleistung der Lkw (über 7,5t) 34,2 Millionen Kilometer auf Autobahn und 7,6 Millionen Kilometer auf Bundesstraßen.

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 20 zu entnehmen ist.

Tabelle 20: Anteil an der Güterverkehrsfahrleistung je Fahrzeugkategorie ab 2019 im Verkehrsbarometer

Anteil an FzKat (Bundesautobahn)	2019	2020	2021
LkW	21%	20%	20%
LZ	16%	16%	16%
SZ	62%	63%	64%
Anteil an FzKat (Bundesstraßen)	2019	2020	2021
Lkw	36%	36%	35%
LZ	16%	16%	16%
SZ	48%	48%	49%

Quelle: (BASt 2023)

Der Vergleich der Wachstumsrate von Verkehrsbarometer (VB) und Mautstatistik (MT) auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen 2021 vs. 2020 der jeweiligen Fahrzeugkategorie zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse des Schwergüterverkehrs auf Bundesautobahnen (siehe Tabelle 18). Dagegen weisen die Ergebnisse auf Bundesstraßen teilweise ab: die Ergebnisse aus der Mautstatistik zeigen einen Rückgang der Fahrleistungen der Lkw und LZ, im Unterschied zum Verkehrsbarometer, das ein Wachstum von 1,5% und 1,3% der DTV aufweist. Der Trend der Fahrleistung der Sattelzüge ist dagegen gleich, aber das Wachstum ist geringer als beim Verkehrsbarometer. In 2020 vs. 2019 zeigen die Sattelzüge unterschiedliche Trends auf Autobahn zwischen den beiden Quellen, aber für die anderen Fahrzeugarten sind die Änderungsraten nahe beieinander. Auf Bundesstraßen ist der Rückgang der DTV laut Verkehrsbarometer geringer als der Rückgang der Fahrleistung in der Mautstatistik.

Die Unterschiede zwischen den Quellen und die entsprechenden resultierenden Unsicherheiten der aus der Mautstatistik angenommenen Wachstumsrate scheinen akzeptabel und bleiben innerhalb einer Bandbreite von maximal 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 2021 ggü. 2020 im Vergleich zum Rückgang 2020 vs. 2019 zu sehen.

Tabelle 21: Wachstumsrate der Fahrleistung bzw. der DTV auf Autobahnen und Bundesstraßen laut Mautstatistik und Verkehrsbarometer

Jahr	FzKat	Verkehrsbarometer		Mautstatistik*	
		Autobahn	Bundesstraße	Autobahn	Bundesstraße
2021/2020	LNF	8,3%	6,6%		
	Lkw	3,6%	1,5%	3,3%	-0,5%
	LZ	2,7%	1,3%	2,4%	-0,7%
	SZ	5,6%	4,7%	5,3%	2,6%
2020/2019	LNF	-7,8%	-4%		
	Lkw	-7,3%	-2,5%	-5,9%	-3,7%
	LZ	-2,5%	-2,2%	-1,1%	-3,4%
	SZ	-0,6%	-1,8%	0,9%	-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 an das Wachstum auf Bundesstraßen laut Mautstatistik angelehnt d.h. für 2021/2020: -0,5%, -0,7% und 2,6% für die jeweiligen Fahrzeugkategorien Lkw, LZ und SZ (siehe Tabelle 21). 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 konstant gelassen.

Aus der Kumulierung der Fahrleistungsergebnisse je Straßen- und Fahrzeugkategorie resultiert die gesamte Fahrleistung je Fahrzeugkategorie für Deutschland (siehe Tabelle 22).

Tabelle 22: Fahrleistung des Güterverkehrs 2019-2021

In Mio. km

Fahrleistung TREMOD	2019	2020	2021
LNF	53.657	50.983	54.572
Lkw	19.589	18.717	18.860
UeKfzs	1.632	1.551	1.576
Lz	10.829	10.598	10.705
SZ	33.385	33.262	34.734

Fahrleistung TREMOD	2019	2020	2021
Summe Schwerverkehr	65.435	64.128	65.876
Summe Güterverkehr	119.092	115.110	120.447

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

Zur Plausibilisierung der Fahrleistungen der Schwere Nutzfahrzeuge in Deutschland kann die Verkehrsleistung aus (Destatis 2022) herangezogen werden (siehe Kapitel 2.1, Tabelle 9). Destatis geht von einem Wachstum der Beförderungsleistung für den Straßenverkehr 2021/2020 von 3,7% aus. Verglichen mit dem TREMOD Wachstum von 2,7% und dem Wachstum auf BAB und Bundesstraßen von Verkehrsbarometer und Mautstatistik (siehe Tabelle 19), weist es auf eine Erhöhung der Effizienz des Güterlogistik hin.

Die Fahrleistung der LNF 2021 lag laut Intraplan bei 59.287 Mio. km, und damit 9% höher als der TREMOD Wert. Ein Grund für die Abweichung ist, dass bei Intraplan auch größere Fahrzeuge bis 3,5t Nutzlast in der Kategorie „leichte Nutzfahrzeuge“ enthalten sind. Hinzu kommen methodische Unterschiede. Der Zuwachs 2021/2020 ist deshalb geringer als in TREMOD mit 3,8% Wachstum gegenüber 7% in TREMOD.

2.2.2.2 Methodik der Ableitung der Güterverkehrsfahrleistung in früheren Jahren

Die Fahrleistungen des Güterverkehrs wurden rückwirkend zwischen 2015 und 2019 angepasst. Folgende Methodik und Anpassungen wurden übernommen.

Die Fahrleistung des Schwerverkehrs wurde bis 2018 von den Straßenverkehrszählungen übernommen (automatische und manuelle Verkehrszählungen). Diese Fahrleistungen müssen zwischen Bus, Lkw und Lastzüge unterteilt werden. Dies geschah bis jetzt auf Basis der manuellen Straßenverkehrszählungen der BASt (Mahmoudi et al. 2020), aber diese Daten werden nur alle 5 Jahre aktualisiert. Die letzte Ausgabe wurde für das Jahr 2015 veröffentlicht. Aus der SVZ von 2021 (pandemiebedingt erst ein Jahr später als geplant) sind vorläufig keine Ergebnisse verfügbar. Bisher wurden die Aufteilung des Schwerverkehrs auf Lkw, Lastzüge und Busse nach 2015 konstant gelassen. Mit dem Verkehrsbarometer liegen nun ab 2019 aktuelle Werte vor.

1. Anpassung der Verteilung der Fahrleistung des Schwerverkehrs je Fahrzeugkategorie (Bus, Lkw, Lastzüge) auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen bis 2019.

Der Schwerverkehr umfasst alle Fahrzeuge mit einem zul. GG. von mehr als 3,5t, deren Fahrleistungen in die Fahrzeugkategorien aufgeteilt werden müssen. Bis 2014 bzw. 2015 sind, wie bereits dargelegt, die Hauptquelle für die Verteilung die Fahrleistungserhebung 2014 und die Straßenverkehrszählung (Mahmoudi et al. 2020), die alle 5 Jahre stattfindet. Ab 2019 wurde diese Verteilung an die jährlichen Ergebnisse der DTV des Verkehrsbarometers für Autobahn und Bundesstraßen angepasst. Rückwirkend, d.h. zwischen 2015 und 2019, wurden die Werte interpoliert. Wie in Tabelle 23 zu entnehmen bleibt die Verteilung relativ konstant über die Jahre.

Tabelle 23: Schwerverkehrsfahrleistung Verteilung je nach Fahrzeugkategorie auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen

Anteil FzKat an FL (Bundesautobahn)	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Bus*	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Lkw	19%	18%	19%	19%	20%	20%
Lastzüge (LZ+SZ)	79%	79%	78%	78%	77%	77%

Anteil FzKat an FL (Bundesautobahn)	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Quelle	FLE 2014	SVZ 2015	Interpoliert	interpoliert	interpoliert	VB
Anteil an FzKat (Bundesstraßen)	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Bus*	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Lkw	33%	34%	34%	34%	33%	33%
Lastzüge (LZ+SZ)	61%	61%	61%	61%	61%	61%
Quelle	FLE 2014	SVZ 2015	Interpoliert	interpoliert	interpoliert	VB

*Das Verfahren der Fahrleistungsableitung für Busse ist in Kapitel 2.2.2.1.2 beschrieben

In den Lkw sind auch UeKfzs enthalten, ihr Anteil an der Lkw-Fahrleistung ergibt sich aus KBA Verkehr in Kilometern. Ihr Anteil schwankt zwischen 12% und 15% mit einem sinkenden Trend zwischen 2014-2018.

2. Anpassung der Verteilung der Fahrleistung des Schwerverkehrs je Fahrzeugkategorie (Bus, Lkw, Lastzüge) auf den restlichen Straßenkategorien bis 2019.

Für die Fahrleistungen auf den übrigen Straßenkategorien gibt es seit der Fahrleistungserhebung 2014 keine Quelle. Dementsprechend wurde die Fahrleistungen für die Jahre 2015 bis einschließlich 2019 aus dem mittleren Wachstum der Jahre 2001-2014 je Fahrzeugkategorie (Lkw und Lastzüge) für Landesstraßen, Kreisstraßen und Gemeindestraßen abgeleitet.

Die Fahrleistung der Lastzüge auf Innerortsstraßen sind ebenso aus dem mittleren Wachstum der Jahre 2001-2014 abgeleitet. Hingegen sind die Fahrleistung auf Innerortsstraßen der Lkw aus Ihrem Anteil an den restlichen Straßenkategorien aus der FLE 2014 abgeleitet: 37%. Dieser Anteil bleibt bis zum Start der neuen Methodik ab 2019 konstant.

Die gesamten Fahrleistungen der Lkw und der Lastzüge resultieren aus der Summe der Fahrleistung auf allen Straßenkategorien.

Tabelle 24: Fahrleistungen der SNF nach Straßenkategorien 2014-2019

In Mio. km

Straßentyp	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Autobahn	32.044	33.049	34.128	35.385	36.454	35.368
AO-Bundesstraßen	8.236	8.139	8.162	8.237	8.240	8.420
AO-Landesstraßen	3.451	3.392	3.330	3.275	3.221	3.167
AO-Kreisstraßen	1.982	1.984	1.982	1.986	1.991	1.994
AO-Sonstige Straßen	4.433	4.667	4.908	5.170	5.446	5.735
Innerortsstraßen	8.535	8.533	8.718	8.908	9.070	9.119
Gesamt	58.681	59.764	61.229	62.961	64.423	63.803

Quelle: BAST-SVZ, FLE 2014, Mautstatistik (2019), eigene Berechnungen

3. Anpassung der Verteilung der Fahrleistung der Lastzüge je nach Fahrzeugkategorie (LZ, SZ) auf Bundesautobahn und Bundesstraßen.

Da die Ergebnisse der SVZ 2015 selbst keine Verteilung zwischen der Fahrleistung der Lastzüge in LZ und SZ aufweisen, muss eine Verteilung für die zwei Straßenkategorien abgeleitet werden.

Die Unterteilung LZ/SZ ist 2019 und in den Folgejahren aus der Verteilung der DTVs aus dem Verkehrsbarometer abgeleitet (wie in 2.2.2.2.1 detailliert beschrieben). Zwischen 2014 (Bäumler et al. 2016) und 2019 (BASt 2023) ist die Verteilung interpoliert, wie in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25: Verteilung der Lastzugfahrleistung auf Autobahnen und Bundesstraßen

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Anteil an Fzkat (Bundesautobahn)						
LZ	38%	34%	31%	28%	24%	21%
SZ	62%	66%	69%	72%	76%	79%
	FLE 2014	SVZ 2015	interpoliert	interpoliert	interpoliert	VB
Anteil an Fzkat (Bundesstraßen)						
LZ	34%	32%	30%	29%	27%	25%
SZ	66%	68%	70%	71%	73%	75%
	FLE 2014	SVZ 2015	interpoliert	interpoliert	interpoliert	VB

Quelle: eigene Berechnungen

Aus der Berechnung ergibt sich einen Zuwachs des Anteils an Sattelzüge über die Jahre, während der Anteil an Lastzüge sich reduziert. In „Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge“ (KBA 2023c) liegt der Anteil der SZ am Güterverkehr deutscher Lkw im Jahr 2014 bei 55%. 2019 erhöht sich dieser Anteil auf 63% und bleibt bis 2021 stabil. Leider umfasst diese Quelle nur deutsche Lkw. Es ist aber sehr plausibel, dass dieser Trend auch für ausländische Lkw valide ist. Es passt dann zusammen mit der angenommenen Verteilung aus (BASt 2023).

4. Anpassung der Fahrleistungen der LNF je Straßenkategorie vor 2020

Vor 2020 ist - wie für den Personenverkehr - die gesamte Fahrleistung aus Verkehr in Kilometern (KBA-ViK) entnommen, in dem die durchschnittliche jährliche Fahrleistung von KBA-ViK mit dem KBA Bestand von TREMOD (Bestand Mitte des jeweiligen Vorjahres und des aktuellen Jahrs) multipliziert wird. Darüber hinaus wird für LNF der Anteil des Ausländerverkehrs (KBA-ViK umfasst nur die Inländerfahrleistung) mit einem Zuschlag von 3,5% berücksichtigt (Quelle FLE 2014).

Die Fahrleistungen auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen sind aus den SVZ (automatisch und manuell) entnommen. Diese liefern jährlich die Fahrleistungen des Leichtverkehrs und alle 5 Jahre der einzelnen Fahrzeugkategorien (Pkw, MZR und LNF), aus denen die Fahrleistungsanteile der LNF abgeleitet werden. Diese Anteile wurden für die Zwischenjahre interpoliert (bis 2015). Ab 2015 wurde diese Verteilung geändert und errechnet sich nun aus dem Mittelwert des jährlichen Wachstums der letzten 14 Jahre (2001 bis 2015).

Tabelle 26: Fahrleistung der LNF nach Straßenkategorien 2015-2021

In Mio. km

Straßenkategorie	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Bundesautobahn	12.688	13.236	13.598	13.989	14.465	13.341	14.447
Bundesstraße	4.285	4.366	4.416	4.515	4.570	4.390	4.679
Landesstraße	5.227	5.431	5.643	5.863	6.093	5.852	6.238
Kreisstraße	3.034	3.219	3.415	3.623	3.844	3.692	3.935
Gemeindestraße	3.743	3.948	4.163	4.390	4.629	4.446	4.739
Innerortsstraße	16.352	17.258	18.464	19.538	20.056	19.263	20.534
Inlandsfahrleistung (inkl. Zuschlag Ausländer von 3,5%)	45.330	47.457	49.698	51.918	53.657	50.983	54.572

Quelle: KBA-ViK, BASt-SVZ, FLE 2014, eigene Berechnungen

Für die restlichen Straßenkategorien (bis auf Innerortsstraßen) sind die Fahrleistungen der LNF bis 2014 unverändert. Ab 2015 wird nun der Mittelwert des jährlichen Wachstums der letzten 13 Jahren (2001 bis 2014) zugrunde gelegt.

Die Fahrleistung der Innerortsstraßen ergibt sich aus der Differenz zwischen der gesamten Fahrleistung (KBA-ViK +3,5% für die Ausländerfahrleistung) und der Summe der anderen Straßenkategorien.

2.2.2.3 Fahrleistungen auf dem nachgeordneten Netz auf Basis der Verkehrsstärken der Länder

Zur Erfassung der Datenlage fragte das Umweltbundesamt bei den Bundesländern die Verfügbarkeit aktueller Zählzeiten und Statistiken vergangener Jahre zur Verkehrsstärke auf dem nachgeordneten Straßennetz (Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen) in maschinenlesbarer Form an. Zudem wurden öffentlich zugängliche Statistiken der Länder hierzu, die in der Regel, wenn verfügbar, bis zum vorletzten oder Vorjahreszeitraum vorliegen, zusammengetragen. Teilweise werden auch Dauerzählstellenauswerte bzw. Verkehrsstärken an automatisierten Erfassungsanlagen der aktuellen Vormonate bis hin zu tagesaktuellen Viertelstundenwerten veröffentlicht. Rückmeldungen mit Datenlieferungen oder -zugängen erfolgten von sechs Bundesländern (Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen) sowie den Stadtstaaten Berlin und Hamburg.

Umfang und Qualität der verfügbaren Daten sind über die Länder hinweg sehr heterogen. Hinsichtlich der Straßenkategorien sind aufgrund der relativ häufig installierten automatisierten Dauerzählstellen aktuelle Verkehrsmengenwerte für die Landesstraßen mit guter Netzabdeckung verfügbar; vereinzelt für Kreisstraßen und selten bis nie für Gemeindestraßen der jeweiligen Länder. Der Anteil der Länder mit verfügbaren Informationen deckt insgesamt 58% des Landesstraßennetz (siehe Tabelle 27) ab. Mit rund 59% ist deren Anteil am gesamten Kreisstraßennetz in Deutschland zwar ähnlich hoch, jedoch können für diese Straßenkategorie keine Trends der verkehrlichen Entwicklung aufgrund zu geringer Zählstellendichte flächendeckend abgeleitet werden.

Tabelle 27: Abschnittslängen (freie Strecke) der Landesstraßen der Bundesländer und deren Anteile an der Gesamtlänge der Straßenkategorie im Bundesgebiet

Abschnittslängen der Landesstraßen	Länge in km	Anteil an Gesamtnetz
Baden-Württemberg	7.698	12%
Bayern	11.679	18%
Berlin	0	0%
Hamburg	0	0%
Nordrhein-Westfalen	9.631	15%
Sachsen	2.994	5%
Sachsen-Anhalt	2.887	4%
Thüringen	2.965	5%
Insgesamt	37.854	58%

Quelle: Fernstraßen-Bundesamt 2022, eigene Berechnungen

Die bereitgestellten und verfügbaren Daten sind:

- ▶ Stundenwerte der Zählstellen (SZ) mit einer Mindestunterteilung nach Kfz, Schwerverkehr und Pkw pro Stunde; teilweise bis hin zur Klassifizierung in 8+1 Fahrzeugklassen.
- ▶ Monatswerte der Zählstellen (MZ) für die DTV in Kfz pro 24 Stunden.
- ▶ Quartalswerte der Zählstellen (QZ) für die DTV in Kfz pro 24 Stunden.
- ▶ Jahreswerte der Zählstellen (JZ) für die DTV in Kfz pro 24 Stunden.
- ▶ Monatswerte je Straßenkategorie (M-Str) für die DTV in Kfz pro 24 Stunden.
- ▶ Jahreswerte je Straßenkategorie (J-Str) für die DTV in Kfz pro 24 Stunden.
- ▶ Jahresfahrleitungen (JFL) in Fahrzeugkilometer pro Jahr.
- ▶ Abschnittslängen (AL) der Zählstellenstandorte

Wie in Tabelle 28 erkennbar sind in den verschiedenen Bundesländern unterschiedliche Sätze dieser Werte zu unterschiedlichen Veröffentlichungszeiträumen verfügbar. Datensätze des Jahres 2020 (vorletztes Jahr) waren in der Regel bis ins Jahr 2014 oder 2015 zurück zugänglich.

Tabelle 28: Übersicht zu verfügbaren bereitgestellten Datenquellen und -inhalte der Bundesländer zu verschiedenen Veröffentlichungszeiträumen

Bundesland	Datenquelle	2020 (vorletztes Jahr)	2021 (Vorjahr)	2022 (aktuelles Jahr)
Baden-Württemberg	Verkehrsmonitoring	JZ, AL		
	Berichte-VM	JZ, AL		
	Dauerzählstellen (DZ)	JZ	JZ	
	Berichte-DZ	J-Str, JZ, MZ	J-Str, JZ, MZ	MZ

Bundesland	Datenquelle	2020 (vorletztes Jahr)	2021 (Vorjahr)	2022 (aktuelles Jahr)
	Stat. Landesamt	J-Str		
Bayern	Dauerzählstellen (DZ)	JZ, MZ	JZ, MZ	MZ
	Berichte-DZ	MZ, JZ	MZ, JZ	MZ
Nordrhein-Westfalen	Dauerzählstellen (DZ)	SZ	SZ	SZ
	Berichte-DZ	J-Str, JZ, JFL	J-Str, JZ, JFL	
	OpenData NRW			J-Str (2015), AL
Sachsen	Dauerzählstellen (DZ)	JZ, AL	JZ, AL	
	Berichte-DZ	J-Str, JZ	J-Str, JZ	MZ, M-Str
Sachsen-Anhalt	Dauerzählstellen (DZ)	MZ, QZ, JZ	MZ, QZ, JZ	MZ, QZ
	Berichte-DZ	MZ, QZ, JZ	MZ, QZ, JZ	MZ, QZ
Thüringen	Dauerzählstellen (DZ)	MZ, AL	MZ, AL	MZ, AL
Berlin	Detektordaten	SZ	SZ	SZ
Hamburg	Dauerzählstellen (DZ)	SZ	SZ	SZ
	Berichte-DZ	JZ		

Quelle: eigene Zusammenstellung

Für das aktuelle Jahr stehen in allen Fällen entweder monatliche DTV-Werte oder Stundenwerte der Zählstellen bereit, um einen aktuellen Trend der Fahrleistung auf den Landesstraßen abzuleiten. Die Stundenwerte der Zählstellen müssen zu durchschnittlichen täglichen Verkehrsmengen (DTV) des Betrachtungszeitraums (z.B. eines Monats) umgerechnet werden. Bei der Aufbereitung der Stundenwerte kommen zudem Qualitätsmerkmale (z.B. Dauer von Aufzeichnungslücken) bei der Fahrzeugerkennung zu tragen, um zu entscheiden, ob die verfügbaren Daten einer Zählstelle hinreichend zur Bestimmung des DTV im Zählstellenbereich selbst, aber auch zur Bestimmung eines mittleren DTV der Straßenkategorie sind. Die verfügbaren DTV-Monatswerte der Zählstellen können in der Regel direkt weiterverwendet werden, um mit den jeweiligen gültigen Abschnittslängen gewichtet einen mittleren DTV je Bundesland und Straßenkategorie abzuleiten. Die Gewichtung der Zählstellenwerte über die jeweils gültigen Abschnittslängen, die jedoch nicht im Falle aller Bundesländer gegeben waren, spielt hierbei eine grundlegende Rolle. Anhand der Landesmittelwerte werden anschließend über die jeweilige Netzlänge der Straßenkategorie die Ergebnisse der einzelnen Länder zu einem gewichteten Wert zusammengefasst, der den Mittelwert des Bundesgebiets repräsentieren soll. Die so ermittelten DTV-Werte einzelner Zeitintervalle (Monate bzw. Jahre) werden zur abschätzenden Trendfortschreibung (Änderungsrate) bis zum möglichst aktuellen Zeitpunkt für das Bundesgebiet herangezogen.

Hierbei traten während der Bearbeitung sowie beim Vergleich der ermittelten Zeitreihenwerte mit verfügbaren Veröffentlichungen vergangener Jahre verschiedene Herausforderungen auf:

- Teilweise fehlende, zugehörige Tagesganglinien zur Korrektur bei fehlerhaften Aufzeichnungen einzelner Zählstellen (Stundenwerte)

- ▶ Wenn angewandt, weitere Informationen Kriterien (z.B. Erfassungsdauer, Zählstellenart) hinsichtlich der Gültigkeit von Zählstellen zur Bildung von durchschnittlichen DTV-Werten der Straßenkategorie.
- ▶ Fehlende Informationen zu gültigen Abschnittslängen für die Gewichtung einzelner Zählstellenergebnisse, um eines landesdurchschnittlichen DTV zu bilden.
- ▶ Unterschiedliche veröffentlichte jahresdurchschnittliche DTV-Werte für ein Bundesland durch zwei Behörden für dieselbe Fahrzeugkategorie und Straßenklasse. Dies konnte zwar auf Rückfrage fachlich-inhaltlich erklärt werden. Offen ist hier der Umgang und die Wahl eines Verfahrens bezüglich der Gewichtung der Landeswerte für die Abschätzung des bundesdeutschen Trends.

Aus diesen Gründen war es nicht möglich auf Basis der verfügbaren Daten und Informationen einen bundesweiten Trend mit dem angestrebten Verfahren abzuschätzen sowie dieses zu validieren. Hierzu bedarf es weitere Daten- und Informationen sowie einheitliche Festlegungen zur Methodik der Bestimmung von Länderdurchschnittswerten je Straßenkategorie. Hilfreich wäre hierzu ein Austausch mit allen Fachstellen der jeweiligen Länder durchzuführen, um zielführende Konventionen zu treffen und möglichst einheitliche Datenbereitstellungsmöglichkeiten zu klären.

Auswertungen der jährlichen DTV-Änderungsraten des Leichtverkehrs auf den Landesstraßen einzelner Länder (u.a. Baden-Württemberg, Nord-Rhein-Westfalen und Sachsen) deuten darauf hin, dass diese im Wesentlichen denen der Bundesstraßen folgen. Im Güterverkehr zeichnen sich hier jedoch größere Unterschiede zwischen Bundesstraßen und Landstraßen ab.

2.2.2.4 Zeitreihe der Fahrleistungen 1990-2021

Die folgende Tabelle 29 fasst die Fahrleistungen aller Fahrzeugkategorien ab 1990 zusammen. Die Inlandsfahrleistungen in Deutschland werden dominiert von der Pkw-Fahrleistung (Anteil 2020: 80,5 %). Diese haben von 1990 bis 2020 um 13 % zugenommen. Im gleichen Zeitraum stiegen die Fahrleistungen der schweren Nutzfahrzeuge um 73,4 % und, mit Abstand am meisten, die der leichten Nutzfahrzeuge (+260 %).

Tabelle 29: Fahrleistung in Deutschland nach Fahrzeugkategorien 1990-2021

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

Jahr	Summe	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
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
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	4,1	36,7	57,0	3,2
2007	704,0	584,1	15,8	4,2	37,8	59,0	3,1
2008	700,8	581,2	15,6	4,2	38,3	58,7	2,9
2009	707,2	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	4,2	39,7	57,5	2,8
2012	725,1	606,5	14,5	4,2	40,2	56,8	2,8
2013	730,9	611,6	14,2	4,3	40,7	57,4	2,8
2014	745,8	622,7	14,2	4,3	43,1	58,7	2,9
2015	756,8	630,0	14,5	4,4	45,3	59,8	2,7
2016	767,8	637,2	14,5	4,6	47,5	61,2	2,8
2017	777,1	642,8	14,5	4,5	49,7	63,0	2,7
2018	780,3	642,2	14,6	4,5	51,9	64,4	2,6
2019	784,3	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	682,8	545,3	13,4	2,9	54,6	64,3	2,4

Quelle: TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

2.2.3 Energieverbrauch und Emissionsfaktoren

2.2.3.1 Übersicht

Die Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs werden aus dem HBEFA 4.2 übernommen, das im Februar 2022 aktualisiert wurde (Notter et al. 2022). Die Emissionsfaktoren wurden im HBEFA 4.2 mit neuen Erkenntnissen aus den Emissionsmessungen, zum Fahrverhalten und aufgrund von Verbesserungen der Modellierung aktualisiert.

2.2.3.2 Übernahme der Emissionsfaktoren

Im HBEFA werden die Emissionsfaktoren unterschieden nach

- Emissionen im warmen Betriebszustand

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

Die Warmemissionen werden im HBEFA je Fahrzeugschicht und Verkehrssituation/Längsneigungsstufe in g/km bzw. MJ/km ausgegeben. TREMOD verwendet die Schichtfaktoren, die auf eine Laufleistung von 50.000 km normiert sind. Das Bezugsjahr für die schichtfeinen Emissionsfaktoren im HBEFA 4.2 ist das Jahr 2020.

In TREMOD werden die mittleren Emissionsfaktoren für Autobahnen, Außerortsstraßen und Innerortsstraßen als dem HBEFA 4.2 übernommen. Für jede Straßenkategorie werden die bisherigen Verteilungen der Fahrleistungen nach Verkehrssituationen übernommen. Die Ergebnisse eines noch laufenden Vorhabens des Umweltbundesamtes (Schmauss et al. 2023) werden derzeit noch validiert. Anschließend wird abgestimmt, wie die neuen Erkenntnisse in TREMOD und im HBEFA berücksichtigt werden können.

Die aktualisierten Emissionsfaktoren für Kaltstart und Verdunstung werden wie die Warmemissionen je Fahrzeugschicht aus dem HBEFA 4.2 in TREMOD übernommen

Es werden folgende Komponenten abgefragt:

- ▶ Alle Fahrzeugkategorien: CO, HC, NO_x, PM, PN, PM_{2,5} sowie FC_MJ (Energieverbrauch in MJ/km)
- ▶ SNF, Lbus, Rbus, MZR: N₂O und NH₃

In TREMOD werden außerdem weitere Rechenschritte mit der HBEFA-Methodik durchgeführt und Komponenten abgeleitet, die zum Teil aktualisiert werden mussten:

- ▶ Berücksichtigung des Laufleistungseinflusses bei Pkw, LNF und SNF. Im HBEFA 4.2 wurden weitere Einflussfaktoren bei den SNF berücksichtigt (siehe Kapitel 2.2.3.3).
- ▶ N₂O und NH₃ bei Pkw und LNF, basierend auf der Copert-Methode (Samaras und Ntziachristos 2021). Das Verfahren wurde gegenüber dem HBEFA 4.1 nicht geändert.
- ▶ HC-Komponenten (NMHC, CH₄, Benzol, Toluol, Xylol) als Anteil von HC je Fahrzeugkonzept, Das Verfahren wurde gegenüber dem HBEFA 4.1 nicht geändert.
- ▶ NO₂-Emissionen als Anteil von NO_x je Fahrzeugkonzept und – neu in HBEFA 4.2 anhängig von der Laufleistung (siehe Kapitel 2.2.3.4).
- ▶ Black Carbon: Berechnet als Partikelfraktion (BC/PM_{2,5}), Das Verfahren wurde gegenüber dem HBEFA 4.1 (Notter et al. 2019) nicht geändert.
- ▶ Kraftstoffabhängige Emissionsfaktoren für CO₂, SO₂ und Pb (siehe Kapitel 1.2 und 1.3)

2.2.3.3 Anpassung Alterungsfunktionen und Laufleistungseinfluss

Die Alterungsfunktionen, die die Veränderung der Emissionsfaktoren mit zunehmendem Fahrzeugalter in Abhängigkeit der Gesamtfahrleistung je Fahrzeug (Laufleistung) abbilden, wurden im HBEFA 4.2 aktualisiert. Bei den schweren Nutzfahrzeugen wurde die Modellierung um die CO-Emissionen und Euro-V-Fahrzeuge erweitert. CO- und NO_x-Emissionen sind somit bei Euro-

V und Euro-VI-SNF und Bussen von der Laufleistung abhängig. Diese Rechenschritte und aktuellen Funktionen wurde in TREMOD übernommen.

Außerdem wurde die Berechnung der kumulativen Laufleistung bei den schweren Nutzfahrzeugen angepasst. Bisher wurde die kumulierte Laufleistung aus den gesamten Jahresfahrleistungen im Inland bezogen auf den Fahrzeugbestand in Deutschland ermittelt. Damit wurde vernachlässigt, dass ein nicht unerheblicher Anteil der Fahrleistungen im Straßengüterverkehr in Deutschland von ausländischen Fahrzeugen erbracht wird. Bezieht man die Gesamtfahrleistung auf den Bestand im Inland, resultiert daraus eine zu hohe mittlere Fahrleistung je Fahrzeug und als Folge eine zu hohe kumulierte Laufleistung.

Dieser Zusammenhang spielte bisher keine Rolle, da die kumulierte Laufleistung vor dem HBEFA 4.1 bei den schweren Nutzfahrzeugen keinen Einfluss auf die Emissionsberechnung hatte. Im HBEFA 4.1 wurde der Laufleistungseinfluss bei Euro-VI-Fahrzeugen eingeführt und berücksichtigt, aber es wurde übersehen, dass die Laufleistung aufgrund des etablierten Rechenverfahrens zu hoch berechnet wird mit der Folge, dass die resultierenden NO_x-Emissionen bei Euro-VI-SNF tendenziell zu hoch ausfallen. Dies wurde mit dem HBEFA 4.2 korrigiert und in der aktuellen TREMOD-Version ebenfalls berücksichtigt.

Eine vollständige Aufteilung der Fahrleistungen und Flotten in Inländer und Ausländer wäre jedoch zu aufwendig und angesichts der begrenzten Rechenkapazitäten der MS-ACCESS-basierten Modelle HBEFA und TREMOD nicht durchführbar gewesen. Allein für die Ableitung einer realistischeren Ableitung der mittleren kumulierten Laufleistung ist dies auch nicht notwendig. Aus der Mautstatistik und der Fahrleistungserhebung 2014 wurde daher abgeleitet, dass die im Inland zugelassenen Fahrzeuge etwa 70% der Fahrleistung bezogen auf die Gesamtfahrleistung im Inland erbringen. Das bisherige Berechnungsverfahren wurde somit beibehalten und die bisherigen Laufleistungen mit dem Faktor 0,7 korrigiert.

2.2.3.4 Differenzierung des NO₂/NO_x-Verhältnisses in Abhängigkeit vom Fahrzeugalter

Bisher war das Verhältnis zwischen NO₂ und NO_x je Fahrzeugkonzept (Fahrzeugkategorie, Antriebsart und Emissionsstandard) ein konstanter Faktor unabhängig vom Fahrzeugalter. Die in den Messungen festgestellte Abhängigkeit der NO₂-Emissionen vom Fahrzeugalter wurde nun im HBEFA 4.2 berücksichtigt und in TREMOD übernommen. Die Messungen beobachten eine Abnahme des NO₂-Anteils mit zunehmendem Fahrzeugalter bei Dieselfahrzeugen aller Fahrzeugkategorien, insbesondere bei den neueren Konzepten. Diese Abnahme wird zwischen 50.000 km und 300.000 km beobachtet (siehe Beschreibung in (Notter et al. 2022), Kapitel 3.3).

2.2.3.5 Übernahme der aktuellen Daten zu Pkw mit Softwareupdates

Die Anzahl der Diesel-Pkw, die Softwareupdates erhalten haben, wurden im HBEFA 4.2 auf Basis der Angaben des UBA fortgeschrieben. Sie beinhalten nun auch die Updates von Fahrzeugen mit Euro-5-Norm mit einem anderen Motor als „EA189“ sowie Fahrzeug der Abgasnorm Euro 6ab. Diese werden in TREMOD wie im HBEFA 4.2 berücksichtigt.

Diesel Pkw mit dem Motor EA189 haben einen Anteil von rund 39 % an allen Euro-5-Diesel-Pkw. Diese erhielten zwischen 2016 und 2020 ein Softwareupdate. Andere für ein Softwareupdate geeignete Euro-5-Diesel-Pkw haben einen Anteil von knapp 15% an der zugelassenen Euro-5-Diesel-Pkw-Flotte. Diese erhielten ab 2019 ein Softwareupdate. Im Jahr 2022 war das Update bei 86% der möglichen Fahrzeuge durchgeführt. Bei den Euro-6ab-Fahrzeugen sind knapp 22% geeignet für ein Softwareupdate. Die Updates wurden ab 2019 durchgeführt und waren 2022 zu 90% abgeschlossen.

2.2.3.6 Differenzierung der SNF und Busse Euro-VI nach Emissionsstufen A-C und D-E

Die Emissionsfaktoren der SNF Euro VI werden im HBEFA 4.2 nach den beiden Kategorien A-C und D-E unterschieden. Die Bestands- und Fahrleistungsdaten in TREMOD müssen daher in der gesamten Zeitreihe (real und Szenario) unterschieden werden. Hierzu wurde die KBA-Statistik neu ausgewertet und in TREMOD übernommen. Fahrzeuge mit der Stufe Euro-VI-D-E wurden vom Jahr 2017 an zugelassen und machten im Jahr 2021 den Großteil der Neuzulassungen aus.

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

Die Effizienzentwicklung wurde im HBEFA 4.2 bis 2020 fortgeschrieben. Die Daten des HBEFA 4.2. wurden überprüft und mit den KBA-Monitoring-Daten 2021 aktualisiert.

Der spezifische Energieverbrauch der Kraftfahrzeuge in TREMOD basiert auf den im HBEFA vorgegebenen Verbrauchsfaktoren der Fahrzeugschichten, die mit dem PHEM-Modell der TU Graz für die Verkehrssituationen im realen Fahrbetrieb ermittelt wurden ((Althaus et al. 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 6.41 bis 2021 aktualisiert. Tabelle 30 zeigt die Typprüfwerte für Benzin- und Diesel-Pkw sowie die im Vorhaben abgeleiteten Zuschläge und die resultierenden Realverbrauchswerte.

Tabelle 30: CO₂-Emissionen aus der Typzulassung (NEFZ) und abgeleitete reale CO₂-Emissionen der Pkw-Neuzulassungen in Deutschland 2011 bis 2021

	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

Quelle: (Althaus et al. 2020), (KBA 2023a)

Bei den leichten Nutzfahrzeugen wird die gleiche Methode verwendet wie bei den Pkw. In TREMOD 6.41 wurden die Werte ebenfalls bis zum Jahr 2021 fortgeschrieben. Die resultierenden Werte sind für Benzin- und Dieselfahrzeuge in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: CO₂-Emissionen aus der Typzulassung (NEFZ) und abgeleitete reale CO₂-Emissionen der LNF-Neuzulassungen in Deutschland 2011 bis 2021

	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
2019	186	28%	237	178	46%	260
2020	183	29%	235	174	47%	256
2021	162	29%	208	171	47%	251

Quelle: (Althaus et al. 2020), (KBA 2023a)

Für die Antriebe mit CNG und LPG der Pkw und LNF wurden die Werte sowie die Entwicklung bis 2021 ebenfalls aktualisiert. Bei den elektrischen Antrieben (BEV und PHEV) wurde die Methode im HBEFA 4.2 unter Verwendung aktueller Daten überarbeitet (siehe Kapitel 2.2.3.8).

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.

2.2.3.8 Übernahme der neuen Verbrauchswerte für BEV und PHEV

Die Verbrauchswerte der BEV und PHEV wurden im HBEFA 4.2 auf Basis aktueller Quellen für den Realverbrauch und den Monitoring-Werten aktualisiert. Diese Werte wurden in TREMOD bis 2021 übernommen.

2.2.3.9 Anpassung der Anteilsfaktoren (Verbrenner-/Elektrischer Betrieb) bei PHEV

Aufgrund aktueller Quellen wurde im HBEFA 4.2 der Anteil des Elektrobetriebs bei den PHEV-Fahrzeugen in der gesamten Zeitreihe angepasst. Diese Werte wurden in TREMOD bis 2021 übernommen.

Tabelle 32: Elektrischer Fahrleistungsanteil bei PHEV-Pkw

	Anteil Elektrisch bis 2021	Anteil Elektrisch ab 2025
Autobahn	11 %	17 %
Außerorts	36 %	56 %
Innerorts	44 %	67 %

2.2.3.10 Integration von Wasserstofffahrzeugen und anderer Technologien

Das HBEFA 4.2 enthält Emissionsfaktoren für eine Vielzahl von Fahrzeugtechnologien, die bisher nicht in TREMOD verwendet werden, weil sie für den deutschen Bestand nicht relevant sind

bzw. noch geringe Stückzahlen aufweisen oder bisher im Trendszenario nicht berücksichtigt wurden. Neben Fahrzeugen mit Benzin- und Dieselantrieb sind die folgenden Technologien verfügbar:

- ▶ CNG: Linienbus, Reisebus, Lkw, Last-/Sattelzug
- ▶ Bifuel CNG/Petrol: Pkw, LNF
- ▶ Bifuel LPG/Petrol: Pkw
- ▶ Batterie elektrisch: alle Fahrzeugkategorien
- ▶ Wasserstoff-Brennstoffzelle: Pkw, LNF, Linienbus, Reisebus, Lkw, Last-/Sattelzug
- ▶ LNG: Linienbus, Lkw, Last-/Sattelzug
- ▶ Flex Fuel (Petrol/E85): Pkw, LNF
- ▶ Ethanol: Linienbus
- ▶ PHEV Diesel/el: Pkw, LNF, Lkw, Last-/Sattelzug
- ▶ PHEV Petrol/el.: Pkw, LNF

Einige dieser Technologien werden in TREMOD bereits verwendet, zum Teil sind sie nicht für alle Fahrzeugkategorien relevant. Andere wie Flex Fuel Petrol/E85 oder Ethanol sind bisher nicht relevant für Deutschland. Tabelle 33 zeigt die bisher in TREMOD verwendeten Antriebsarten (siehe auch Kapitel 2.2.1).

Tabelle 33: In TREMOD verwendete Antriebsarten in Deutschland

Antrieb	PKW	KKR+KR	LBus	RBus	LNF	LKW+LZ	SZ	UeKfzl	UeKfzs
Benzin 2-Takt		X							
Benzin 4-Takt	X	X			X			X	
Diesel	X		X	X	X	X	X	X	X
bifuel CNG/petrol	X				X				
bifuel LPG/petrol	X								
CNG			X			X			
BEV	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Hybrid diesel/electric			X						
LNG							X		
PHEV diesel/electric	X								
PHEV petrol/electric	X				X				

Für Zukunftsbetrachtungen könnten vor allem Brennstoffzellen-Fahrzeuge von Bedeutung sein, da sie in vielen aktuellen Szenarien bereits eine Rolle spielen (z. B. Projektionsbericht). Außerdem sind bereits einige Fahrzeuge im deutschen Fahrzeugbestand enthalten: 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

(KBA 2023a). Daher wurden die im HBEFA definierten Fahrzeugschichten mit Brennstoffzellen mit den hinterlegten Verbrauchsfaktoren in TREMOD übernommen. Die folgende Tabelle fasst die Verbräuche zusammen.

Tabelle 34: Verbräuche von Brennstoffzellenfahrzeugen

In MJ pro Fahrzeugkilometer

Fahrzeugkategorie	Segment	Motorway	Rural	Urban
Coach	Coach ≤18t	7,5	6,3	7,7
Coach	Coach >18t	8,7	7,7	11,1
Coach	Coach Midi ≤15t	6,5	5,3	5,8
HGV	RT ≤7,5t	5,2	4,4	3,1
HGV	RT >7,5-12t	5,7	5,0	4,4
HGV	RT >12t	6,3	5,7	5,9
HGV	TT/AT	10,8	10,0	10,9
LCV	N1-III	3,4	2,1	1,9
PC	-	1,5	1,1	1,3
Urban bus	Ubus Midi ≤15t	6,4	6,6	8,1
Urban bus	Ubus >15-18t	7,4	8,6	11,5
Urban bus	Ubus >18t	8,7	11,3	16,3

Quelle: HBEFA 4.2

Die hinterlegten Verbrauchsfaktoren von Last- und Sattelzüge wurden mit (Jöhrens 2022) abgeglichen. Es konnte eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Beim Pkw decken sich die Verbräuche gut mit dem aktuell gängigsten Fahrzeugmodell Toyota Mirai (Spritmonitor 2023). Bei den leichten Nutzfahrzeugen und Lkw gibt es größere Unterschiede zwischen den Werten im HBEFA 4.2 und (Jöhrens 2022). Sollten Brennstoffzellenfahrzeuge in zukünftigen TREMOD-Versionen verwendet werden, sollten die Verbrauchswerte aktualisiert werden.

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 (DB AG 2022).

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 2021 im Personennahverkehr bei 38 % und im Güterverkehr bei 54 %.

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 2021 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 2021 vorgenommen werden, die von der DB AG intern zur Verfügung gestellt wurde (DB AG 2022). Danach lag der Anteil der Dieseltraktion der sonstigen Eisenbahnen 2021 im Personennahverkehr bei ca. 31 % und im Güterverkehr bei 5,5 %.

Tabelle 35: Verkehrsleistungsentwicklung des Personenverkehrs der Eisenbahnen in Deutschland 1994-2021

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

Jahr	Personennahverkehr DB	Personennahverkehr NE	Personennahverkehr gesamt	davon mit Diesel	Personenfernverkehr
2002	36,7	1,5	38,2	10,2	32,7
2003	37,9	1,8	39,7	10,2	31,6
2004	37,9	2,6	40,5	10,4	32,3
2005	38,9	4,3	43,2	11,2	33,6
2006	40,3	4,2	44,5	11,3	34,5
2007	40,7	4,3	45,0	11,3	34,1
2008	41,6	5,5	47,1	10,9	35,5
2009	41,0	6,5	47,5	11,0	34,7
2010	41,4	6,6	48,0	10,9	36,0
2011	42,3	7,6	49,9	11,9	35,4
2012	43,4	8,2	51,5	12,3	37,2
2013	43,6	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	13,0	34,4	7,4	24,7

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

Nicht dargestellt ist in Tabelle 35 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. Bis 2021 ging sie um 37% gegenüber 2019 zurück.

Tabelle 36: Verkehrsleistungsentwicklung des Güterverkehrs der Eisenbahnen in Deutschland 1994-2021

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

Jahr	Güterverkehr DB	Güterverkehr NE	Güterverkehr gesamt	davon mit Diesel	Hafen- und Werkbahnen
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
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	69,5	129,9	7,6	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; Gesamtverkehrsleistung 2021 abgestimmt mit DLR und INTRAPLAN

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 ab 2018. Eine Abstimmung der Werte wird empfohlen.

Tabelle 37: Berechneter Dieserverbrauch der Eisenbahnen in Deutschland im Vergleich mit der Energiebilanz 1994-2021

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	20,5	5,8%
2005	14,0	4,7	18,8	0,8	18,5	-5,3%
2006	13,3	4,5	17,8	0,5	17,6	-3,6%
2007	13,0	4,4	17,4	0,5	17,5	-2,5%
2008	12,8	5,3	18,2	0,5	17,2	-7,9%
2009	11,4	5,6	17,0	0,5	15,3	-12,1%
2010	11,4	5,7	17,2	0,5	15,6	-11,7%
2011	11,1	5,8	16,9	0,6	15,7	-10,1%
2012	10,6	6,1	16,7	0,6	14,4	-16,6%
2013	10,4	8,0	18,4	0,7	14,6	-23,5%
2014	9,5	5,8	15,3	0,7	13,0	-18,2%
2015	8,8	6,8	15,6	0,7	14,0	-13,3%
2016	8,7	6,8	15,5	0,8	14,5	-10,9%

Jahr	Dieserverbrauch DB	Dieserverbrauch NE	Dieserverbrauch DB+NE	Dieserverbrauch HWB	Dieserverbrauch Energiebilanz	Differenz Energiebilanz/Verbrauch berechnet (DB+NE+HWB)
2017	8,9	7,0	15,9	0,8	11,9	-28,3%
2018	8,7	7,3	16,0	0,8	10,0	-40,6%
2019	8,3	6,7	15,0	0,7	11,4	-27,5%
2020	7,5	7,2	14,7	0,7	11,7	-24,2%
2021	7,6	7,5	15,2	0,7	11,8	-25,4%

Quellen: DB AG, AG Energiebilanzen, eigene Berechnungen

Trotz zunehmender Verkehrsleistungen blieb der Stromverbrauch für den Fahrbetrieb annähernd gleich. Der Stromverbrauch des Schienenverkehrs liegt bei der AG Energiebilanzen bis 2011 deutlich höher als über andere Statistiken nachweisbar ist. Es besteht die Vermutung, dass die AG Energiebilanzen auch andere, nicht traktionsbedingte und nicht zum Schienenverkehr gehörende Energieverbräuche erfasst. 2013 wurden die Werte ab 2012 revidiert und um ca. ein Viertel gegenüber den Vorjahren abgesenkt. Die Werte liegen damit auf dem Niveau der TREMOD-Ergebnisse. Eine Begründung für die Absenkung liefert die AG Energiebilanzen nicht.

2.3.5 Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren der Dieseltraktion werden von der DB AG motorenfein entsprechend ihrer Anteile an der Betriebsleistung im Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr sowie für Rangieren abgeleitet. Das grundsätzliche Verfahren wurde im Rahmen einer Studie des Umweltbundesamtes zusammen mit ifeu entwickelt (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 38: Emissionsfaktoren des dieselbetriebenen Schienenverkehrs für ausgewählte Jahre

In g/kg

Komp.	Zugart	1995	2005	2010	2015	2017	2018	2019	2020	2021
CO	Rangieren	18,0	9,0	5,6	4,3	3,9	3,9	3,7	4,1	3,9
	GV	11,5	9,7	9,8	5,4	5,2	5,3	5,4	6,4	5,5
	PFV	14,1	9,4	6,5	6,7	6,3	5,2	6,5	6,1	6,0
HC	PNV	10,6	5,1	3,9	3,7	3,7	3,5	3,4	3,3	3,4
	Rangieren	2,9	2,1	2,3	1,7	1,7	1,8	1,8	1,7	1,7
	GV	11,5	9,7	9,8	5,4	5,2	5,3	5,4	6,4	5,5
	PFV	14,1	9,4	6,5	6,7	6,3	5,2	6,5	6,1	6,0

Komp.	Zugart	1995	2005	2010	2015	2017	2018	2019	2020	2021
	PNV	10,6	5,1	3,9	3,7	3,7	3,5	3,4	3,3	3,4
NOX	Rangieren	49,4	38,5	39,0	34,0	33,1	33,1	32,7	31,7	33,1
	GV	50,5	53,9	51,5	35,1	33,8	33,6	34,3	35,5	33,0
	PFV	60,0	53,3	48,4	49,7	45,9	40,1	48,9	46,1	45,8
	PNV	49,2	45,7	39,4	34,9	32,5	31,2	28,1	30,5	30,9
Part	Rangieren	1,9	1,5	1,0	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
	GV	1,9	1,6	1,3	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8	0,7
	PFV	1,8	0,9	0,6	0,5	0,5	0,3	0,4	0,4	0,5
	PNV	1,8	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5

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 (Knörr 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 2019). In den letzten Jahren hatten neben ungünstigen Wasserständen vor auch die COVID-19 Pandemie im Jahr 2020 und 2021 einen dämpfenden Einfluss. Dabei sank auch die durchschnittliche Beladung pro Schiffskilometer. Im Jahr 2021 lag die Verkehrsleistung bei 48,2 Mrd. km (siehe Tabelle 39).

Tabelle 39: Verkehrs- und Fahrleistung der Binnenschifffahrt 1995-2020

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

Bezugsjahr	Verkehrsleistung (Mrd. tkm)	Fahrleistung (Mio. km)	Mittlere Beladung (t)
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
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	975

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 16,7 PJ im Jahr 2021 zurück. Der mittlere spezifische Energieverbrauch lag 2021 bei 0,35 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 wegen Niedrigwassers geringer als sonst, wodurch ein höherer spezifischer Energieverbrauch in diesem Jahr resultiert.

Tabelle 40: Verkehrsleistung und Energieverbrauch der Binnenschifffahrt 1995-2021

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

Bezugsjahr	Verbrauch (PJ)	spez. Verbrauch (MJ/tkm)
2020	16,0	0,35
2021	16,7	0,35

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. Da keine vollständige Statistik für die Alterszusammensetzung der Binnenschiffsmotoren existiert, muss die Zusammensetzung der Motoren nach Baujahren zum Teil aus den Schiffsbaujahren² und Absterbefunktionen berechnet werden, vgl. (Knörr et al. 2013). Letztere werden mittels einer Weibull-Funktion beschrieben, siehe Tabelle 41. Die mittlere Lebensdauer wird je nach Baujahr und Schiffsgröße zwischen 14 und 38 Jahren angenommen, wobei auch noch ältere Motoren im Bestand vorkommen (Tabelle 41).

Tabelle 41: Kennwerte für die Absterbefunktion von Binnenschiffsmotoren

Baujahre/Tragfähigkeit	k	λ	Mittlere Lebenszeit / Alter 50 % außer Betrieb	Alter >95 % außer Betrieb
>1990 oder <1.500 t	42,9	3	38	61

² Unter der Annahme, dass das Schiffsbaujahr dem Baujahr des Erstmotors entspricht.

Baujahre/Tragfähigkeit	k	λ	Mittlere Lebenszeit / Alter 50 % außer Betrieb	Alter >95 % außer Betrieb
1990-2000 und >1500 t	22,6	3	20	32
ab 2000 und >1500 t	16,8	2	14	29

Aus den baujahrabhängigen Emissionsfaktoren und den jeweiligen Flottenzusammensetzungen in einem Jahr werden in Tabelle 42 die durchschnittlichen Emissionsfaktoren für ausgewählte vergangene Jahre dargestellt. Es zeigt sich, dass diese in den meisten Fällen über die Jahre stark gesunken sind.

Tabelle 42: Mittlere Emissionsfaktoren der Binnenschifffahrt (in g/kg) für ausgewählte Jahre

Schadstoff	1994	2000	2005	2010	2015	2020	2021
CO	16,9	14,5	12,8	11,0	9,8	8,9	8,8
HC	3,9	3,4	3,2	2,9	2,7	2,5	2,5
NO _x	57,1	57,4	55,4	52,9	50,1	47,9	47,6
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	0,059
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	0,564
SO ₂	2,600	2,600	2,600	2,600	0,016	0,016	0,016
Benzol	0,075	0,065	0,060	0,056	0,051	0,047	0,047
Toluol	0,031	0,027	0,025	0,023	0,021	0,020	0,020
Xylol	0,031	0,027	0,025	0,023	0,021	0,020	0,020

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 2021 integriert. Zudem werden die Emissionsfaktoren der folgenden neuen Flugzeugtypen integriert: Embraer Phenom 100, Embraer Phenom 300, Embraer Legacy 500 / Praetor 6, Boeing B 737 MAX 9, Airbus A330-800neo.

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 2019). In der Aktualisierung werden somit 23 Flughäfen abgedeckt (Stand 2021). Daraus lassen sich über die Zuordnung nach Entfernungsklassen die Flugzeugkilometer sowie die Personen- und Tonnenkilometer berechnen.

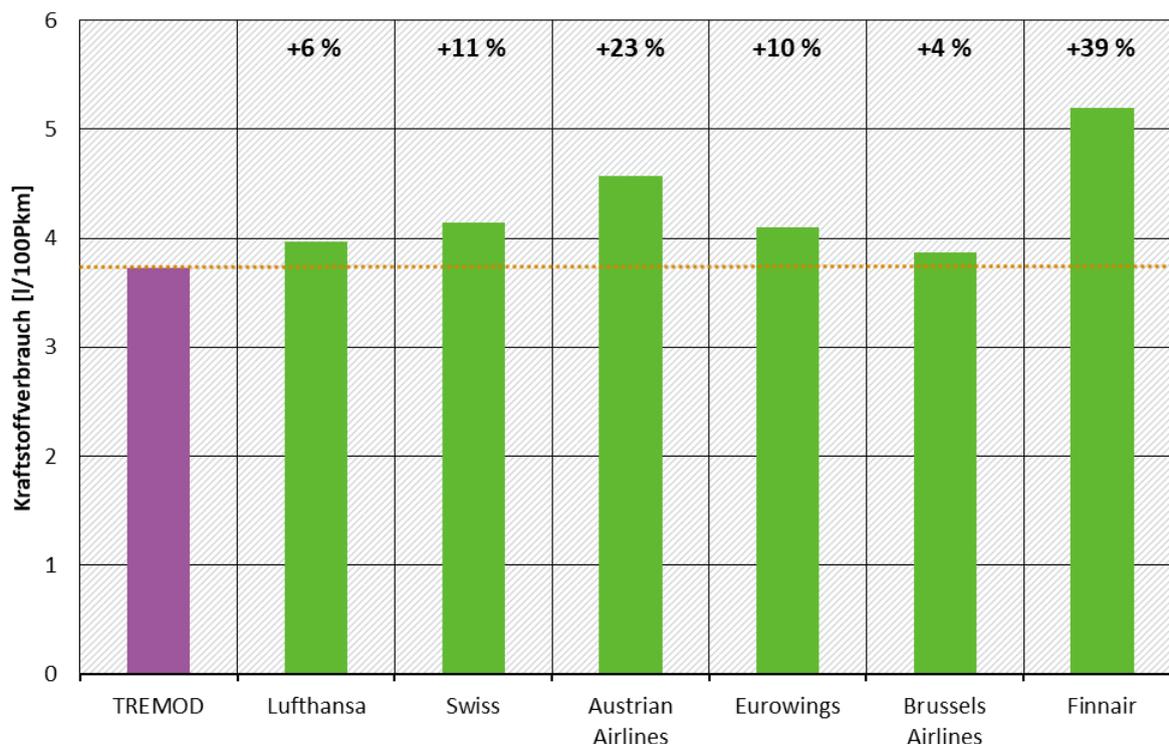
Für den gewerblichen Verkehr auf sonstigen Flugplätzen (weniger als 150.000 Passagiereinheiten) und den nicht-gewerblichen Flugverkehr liegen keine differenzierten Daten vor. Hier erfolgten Abschätzungen aufgrund der vom Statistischen Bundesamt ausgewiesenen Flugbewegungen, die Informationen über die Anzahl Starts differenziert nach Flugzeuggrößenklassen enthalten. Diese erfolgte erstmalig anhand einer weiteren Sonderauswertung von Destatis, die den sonstigen Flugverkehr abdeckt.

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

Die nach diesem Verfahren berechneten spezifischen Energieverbrauchswerte je Personenkilometer (auf HVF) liegen aktuell niedriger als anderen Angaben, so z. B. Verbrauchsangaben der Fluggesellschaften der Lufthansa Group und Finnair für das Jahr 2021; siehe Abbildung 3. Vergleicht man die Verbräuche des Jahres 2021 mit denjenigen des Vorjahres lässt sich feststellen, dass sowohl nach der TREMOD-Berechnung als auch den Angaben der Fluggesellschaften (außer Brussels Airlines und Finnair) der Verbrauch pro Personenkilometer deutlich gesunken ist. Der Verbesserung liegt nach TREMOD bei ca. 13 %. Hauptursache ist die gestiegene Auslastung.

Abbildung 3: Vergleich des in TREMOD ermittelten Kerosinverbrauchs im Flugverkehr (auf HVF) mit Angaben von Fluggesellschaften für das Jahr 2021



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 (Deutsche Lufthansa AG 2022), Finnair aus (Finnair 2022), TREMOD aus TREMOD-AV.

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.

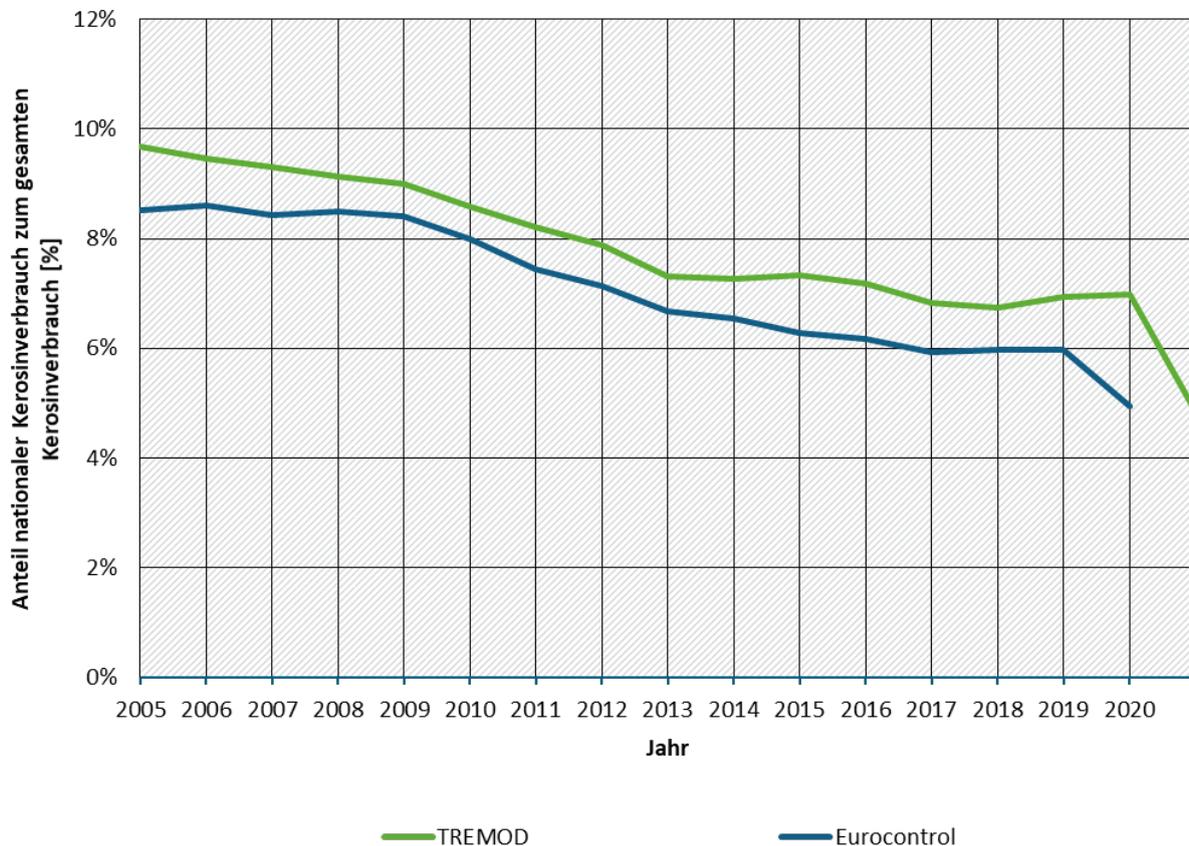
- ▶ Die Aufteilung des gesamten Energieeinsatzes auf nationalen und internationalen Flugverkehr wird entsprechend den ermittelten Anteilen aus den TREMOD-Ergebnissen vorgenommen. Der Energieeinsatz des nationalen Verkehrs wird direkt aus TREMOD übernommen. Die Differenz der Energiebilanz zum errechneten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

2.5.3 Verkehrs- und Betriebsleistungen

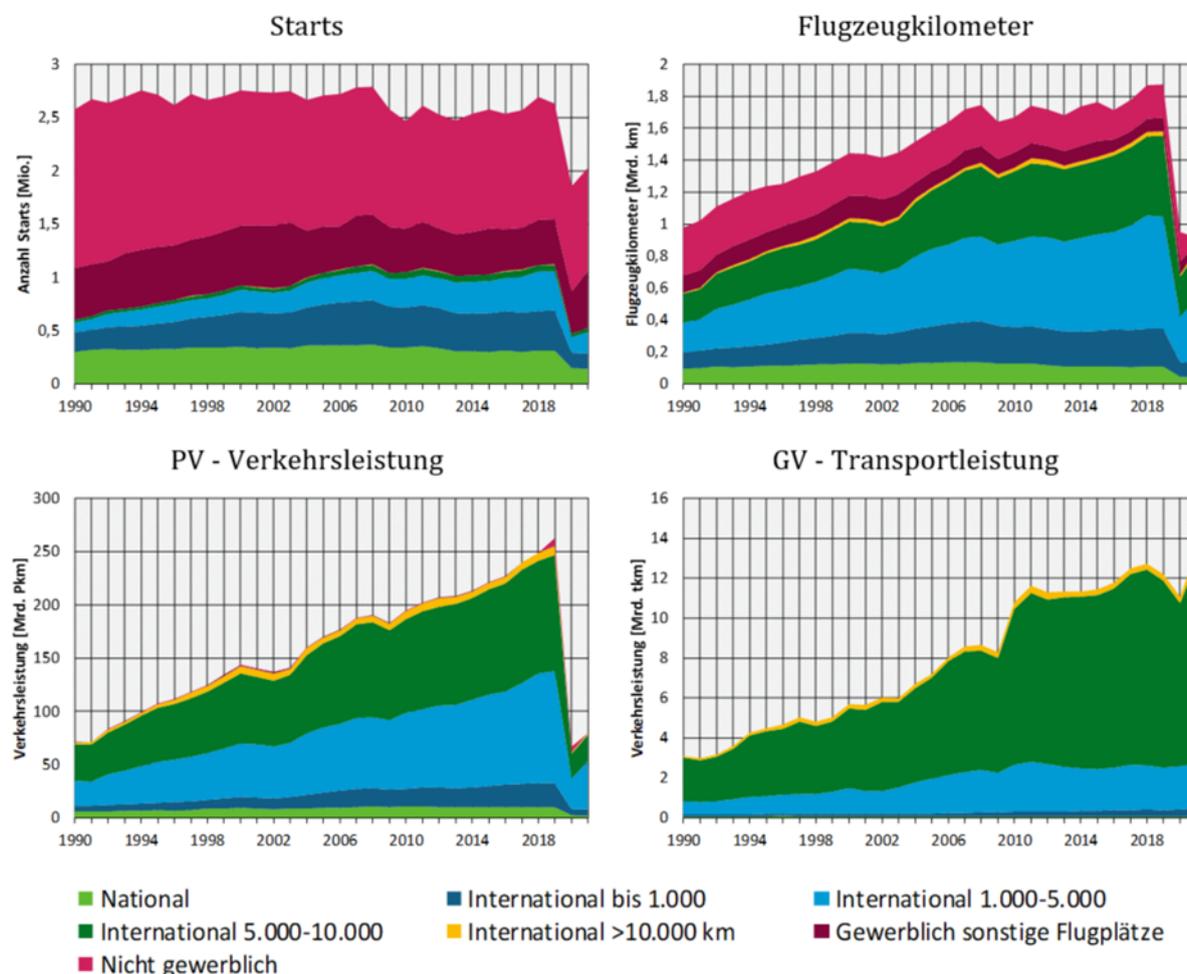
Die Verkehrsleistung des Flugverkehrs auf den ausgewählten Flughäfen ist in der Vergangenheit stark angestiegen. Die Personenverkehrsleistung ist dabei zwischen 1990 und 2019 um den Faktor 3,6 gestiegen und die Güterverkehrsleistung hat sich fast vervierfacht. In den „Coronajahren“ 2020 und 2021 sanken jedoch die Verkehrsleistungen. Im Güterverkehr lag der Wert 2020 ca. 9 % unterhalb des Vorjahres und im Personenverkehr war er knapp 75 % niedriger. Im Jahr 2021 erholte sich der Flugverkehr leicht. Der Güterverkehr stieg ggü. 2020 um 20 % und lag somit über dem Niveau des Jahres 2019. Der Personenverkehr stieg zwar ebenfalls um 18 %, jedoch lag die Verkehrsleistung weiterhin deutlich unterhalb des Niveaus von 2019.

Seit 1990 haben sich sowohl die zurückgelegte Strecke als auch die Kapazität der Flugzeuge deutlich erhöht. Des Weiteren kam es bei den Starts im gewerblichen Flugverkehr (auf den Hauptverkehrsflughäfen) 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 (nationale und internationale) 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 um 58 % ggü. 2019. Die Flugzeugkilometer sanken um 57 %. Die durchschnittliche Fluglänge betrug 1.454 km. Im Jahr stiegen die Werte wiederum leicht an ggü. 2020. Es starteten 12 % mehr gewerbliche Flüge von den HVF. Hierbei stiegen die Flugzeugkilometer um 23 %. Die durchschnittliche Fluglänge betrug 2021 ca. 1.593 km.

Am geringsten waren beim gewerblichen Flugverkehr auf den ausgewählten Flughäfen die Zuwachsraten im nationalen Flugverkehr. Der Anteil des nationalen Flugverkehrs hat sich dadurch im betrachteten Zeitraum verringert: Bei den Starts sank der Anteil von 49,8 % im Jahr 1990 auf 28,1 % im Jahr 2019. Im Jahr 2020 lag der Wert bei 32,1 % und 2021 bei 26,5 %. Deutlich niedriger ist sein Anteil an den Flugzeugkilometern (2020: 6,6 %, 2021: 4,5 %), respektive bei den Personenkilometern (2020: 4,2 %, 2021: 2,6 %) und Tonnenkilometern (2020: 0,4 %, 2021: 0,4 %).

Beträchtliche Anteile an den Starts haben der gewerbliche Flugverkehr auf sonstigen Flugplätzen sowie der nicht-gewerbliche Flugverkehr. Zusammen weisen sie relativ konstant einen Anteil von ca. 55-60 % an den Starts im Zeitraum 1990-2019 auf. In den Jahren 2020 und 2021 sank der gewerbliche Flugverkehr jedoch deutlich überproportional. Nicht-gewerbliche Starts lagen in beiden Jahren lediglich rund 10 % unterhalb des Jahres 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 trägt bspw. der Anteil des sonstigen Flugverkehrs (nicht gewerblicher Flugverkehr und gewerblicher Flugverkehr auf den sonstigen Flugplätzen) am gesamten Energiebedarf des Flugverkehrs in Deutschland lediglich ca. 2 %. Abbildung 5 veranschaulicht die relevanten Verkehrskennzahlen zwischen 1990 und 2021.

Abbildung 5: Entwicklung der Starts, Flugzeugkilometer und Verkehrsleistungen des Flugverkehrs in Deutschland 1990-2021

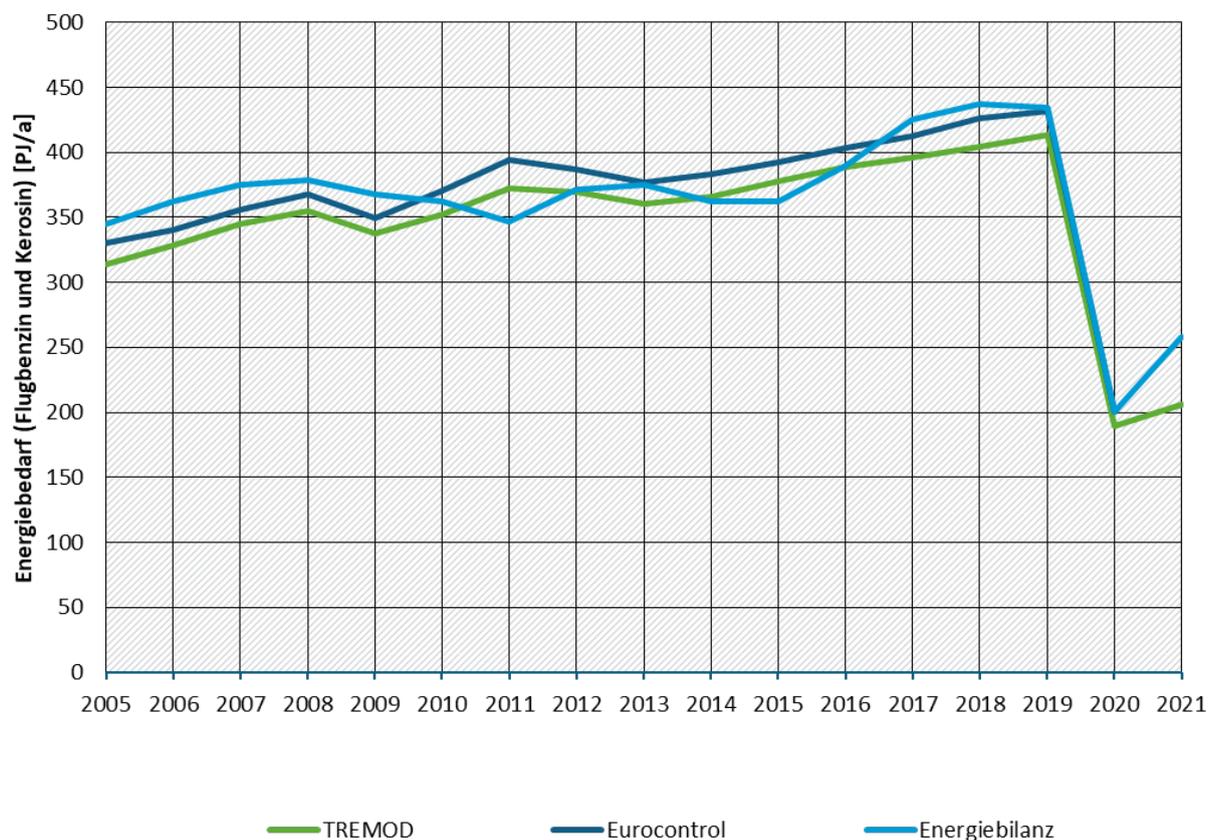


Anmerkungen zur Datenbasis: Anzahl Starts und Aufkommen für den gewerblichen Flugverkehr auf ausgewählten Flugplätzen ist differenziert nach national/international und nach Distanzklassen gegeben. Hieraus können die Flugzeugkilometer und Verkehrsleistung für den gewerblichen Verkehr auf ausgewählten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

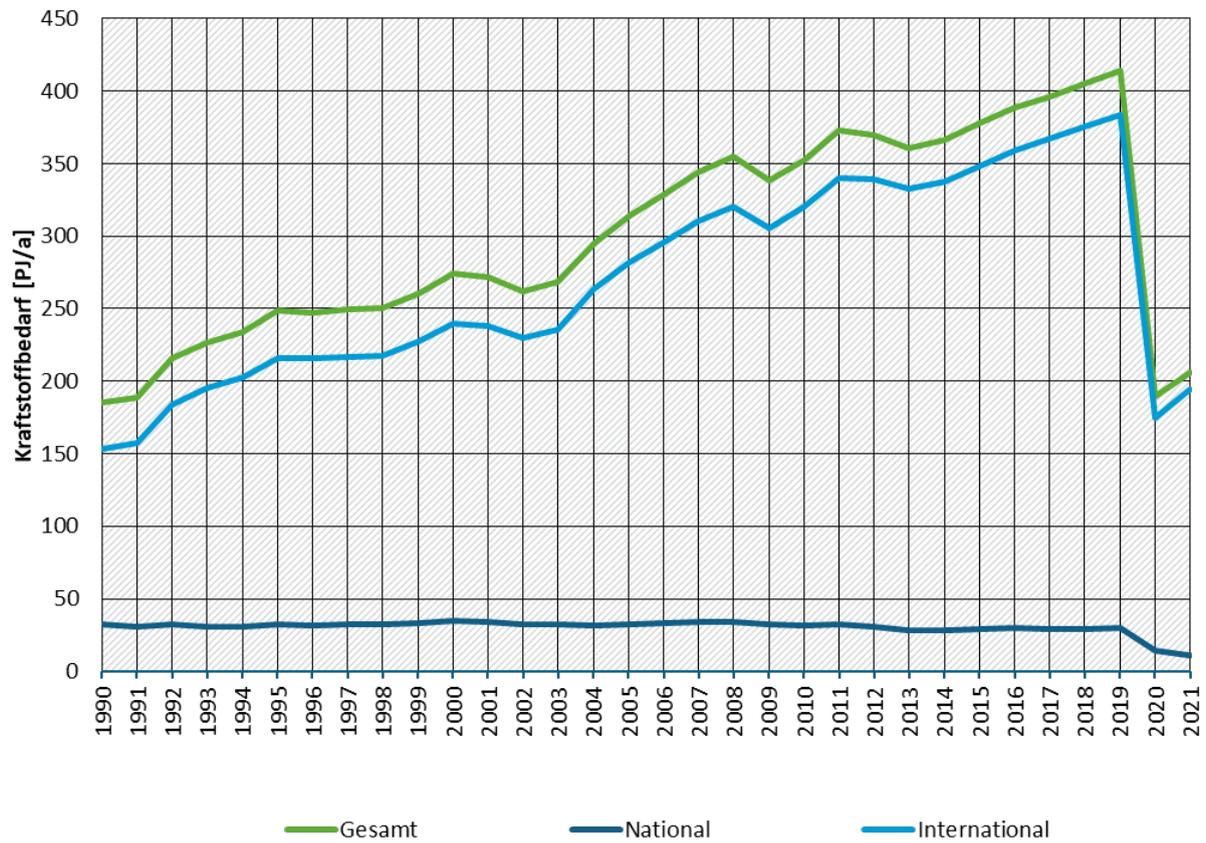
Abbildung 6: Jährlicher Energiebedarf (Flugbenzin und Kerosin) des Flugverkehrs in Deutschland nach TREMOD, Eurocontrol und Energiebilanz



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

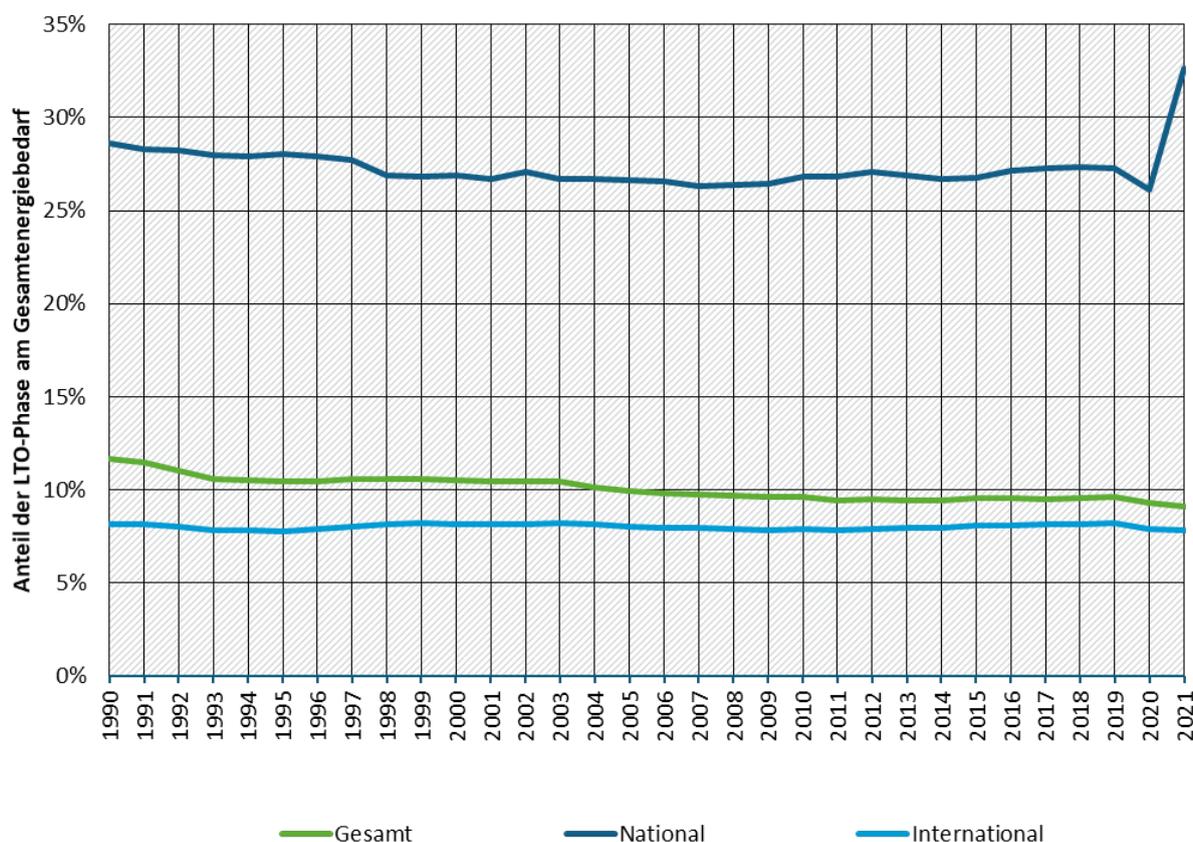
Der Energiebedarf (Kerosin und Flugbenzin) des gesamten Flugverkehrs ist nach TREMOD zwischen 1990 und 2019 um 122 % gestiegen. Im Jahr 2020 sank er ggü. 2019 um 54 %, sodass er ungefähr das Niveau (+2,0 %) von 1990 erreichte. Im Jahr 2021 stieg der Energiebedarf wieder um 9 % ggü. 2020. Da der Energiebedarf des nationalen Flugverkehrs seit 1990 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 %. Ein Jahr später 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 26 % (siehe Abbildung 8). Der mittlere Anteil des LTO ging über die Zeitreihe zurück (abgesehen vom Jahr 2021), da die durchschnittliche Reisedistanz stieg. Im Jahr 2021 sank die durchschnittliche Reisedistanz deutlich, wodurch der Anteil des LTO am Gesamtverbrauch bei den nationalen Flügen stieg.

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

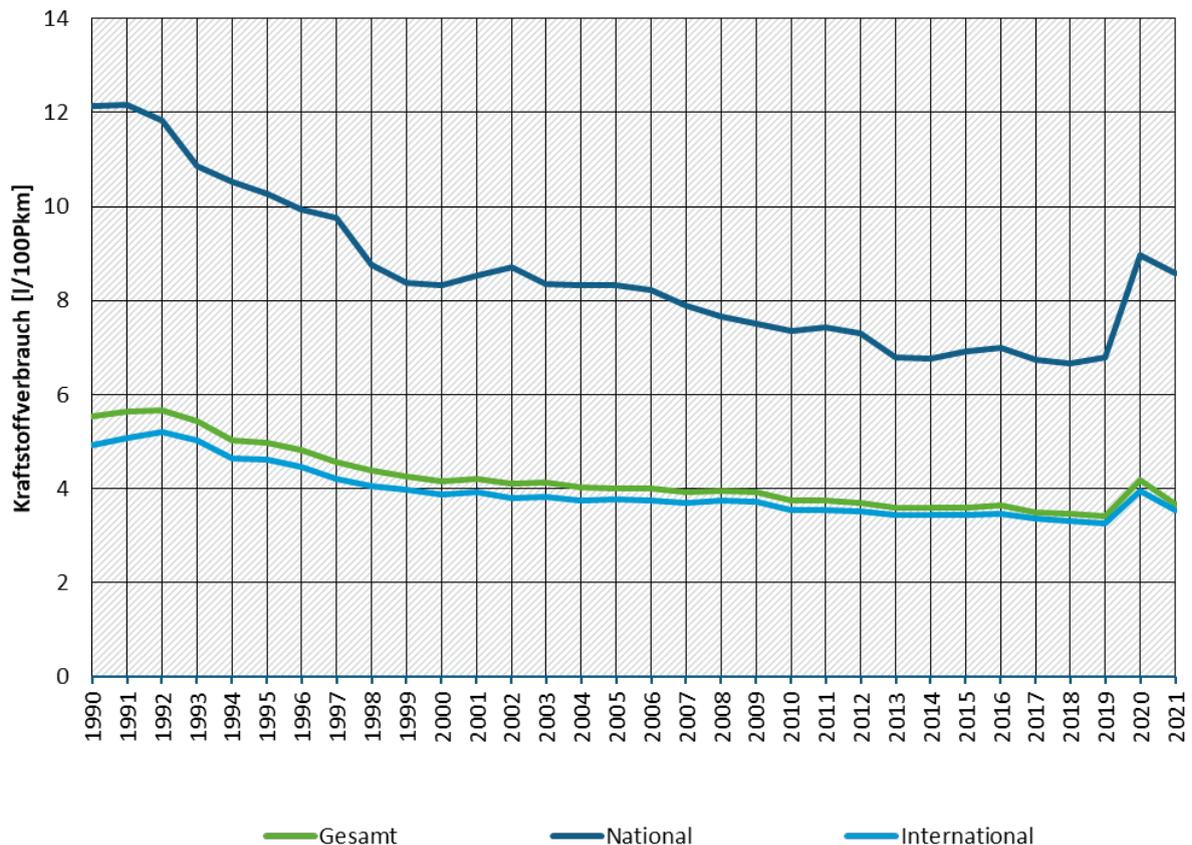


Quelle: eigene Berechnung mit TREMOD

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. Im Folgejahr 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



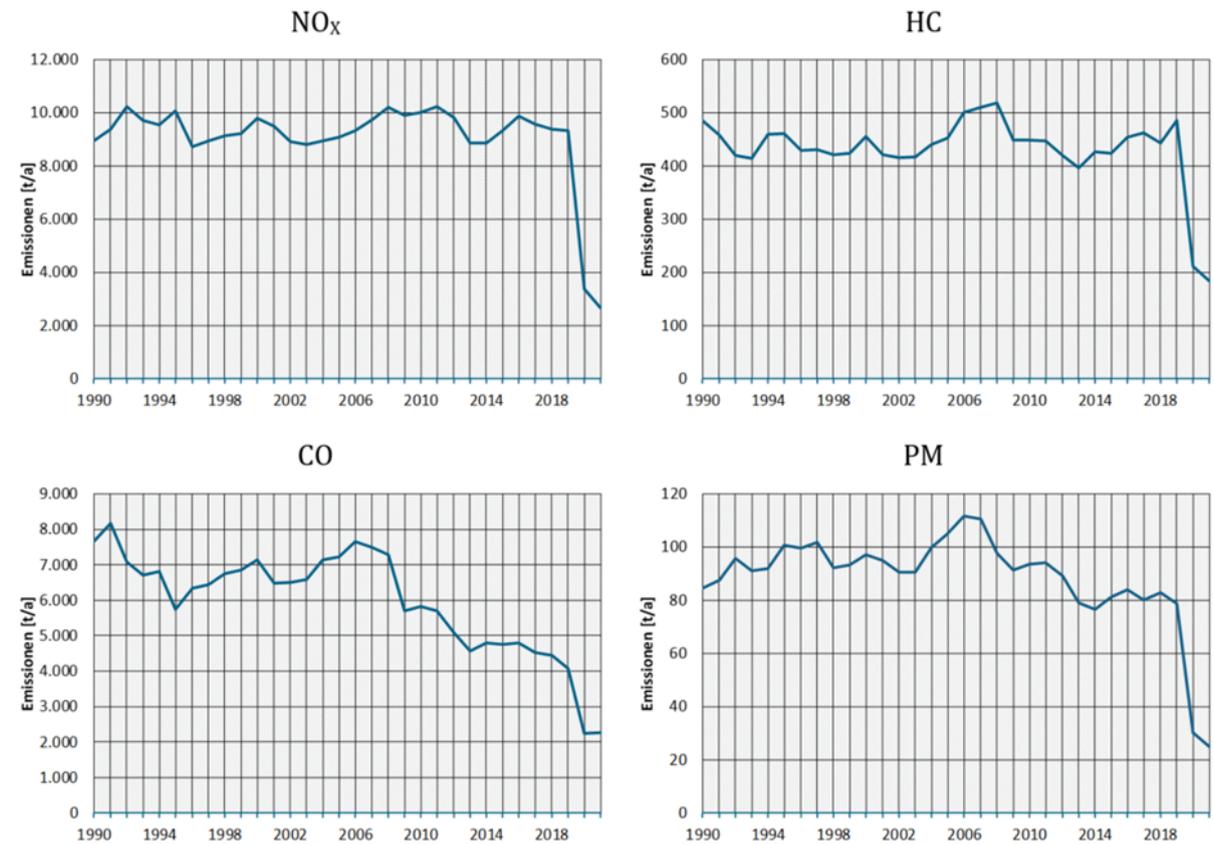
Quelle: eigene Berechnung (mit TREMOD)

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. Abbildung 10 stellt die zeitliche Entwicklung dieser Schadstoffemissionen des gewerblichen nationalen Flugverkehrs auf den ausgewählten Hauptverkehrsflughäfen dar. Betrachtet man den Verlauf der Emissionen kann eine Stagnation der NO_x-, HC- und PM-Emissionen beim nationalen Flugverkehr festgestellt werden. Bei den CO-Emissionen konnte sogar ein Rückgang festgestellt werden.

Beim internationalen Verkehr (auf den Hauptverkehrsflughäfen) stiegen die PM-Emissionen zwischen 1990 und 2019 um 126 %. Im Jahr 2020 sank der Wert um 56 % ggü. 2019 und stieg wiederum um 22 % im Folgejahr. Auch bei den Stickoxiden kann ein deutlicher Anstieg bis 2019 beobachtet werden (+198 %). Durch die Pandemie sank demgegenüber der Wert um 55 % vgl. mit 2019 und stieg im Folgejahr um 16 %. Die HC-Emissionen sanken trotz des deutlichen Verkehrsmengenanstiegs im internationalen Verkehr um 24 % bis 2019. Der Wert des Jahres 2020 lag 59 % unterhalb des Vorjahres. Im Jahr 2021 lag der Wert 50 % unterhalb des Niveaus des Jahres 2019. Die absoluten CO-Emissionen stiegen zwischen 1990 und 2019 leicht um 9 % und sank 2020 um 57 % ggü. 2019, um im Folgejahr wieder um 24 % ggü. 2020 zu steigen.

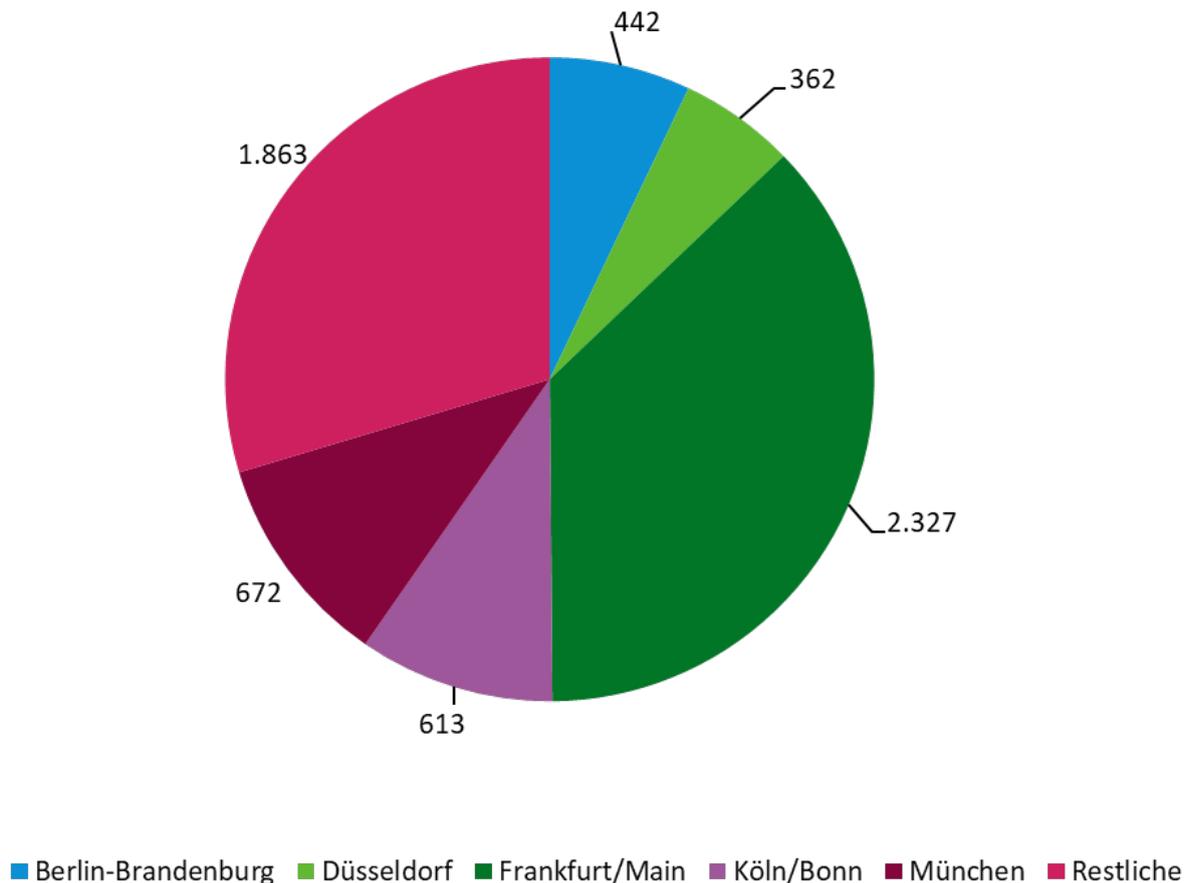
Abbildung 10: NO_x-, CO-, HC- und PM-Emissionen des nationalen Flugverkehrs auf den ausgewählten Flughäfen 1990-2021



Quelle: eigene Berechnung (mit TREMOD)

Abbildung 11 zeigt exemplarisch die NO_x-Emissionen des gewerblichen Flugverkehrs der fünf größten Flughäfen im Jahr 2021. Die größte Belastung hat der Flughafen Frankfurt am Main mit rund 2.330 t NO_x pro Jahr (ca. 37 %). Die fünf Flughäfen haben einen Anteil von 70 % 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 2021 differenziert nach Flughäfen [t/a]



Anmerkung: Der nicht gewerbliche Flugverkehr ist hier nicht berücksichtigt, jedoch weist dieser insgesamt nur einen Anteil an der LTO-Phase von ca. 1 % auf. Quelle: eigene Berechnung (mit TREMOD)

2.6 Energiebilanz

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 (Gniffke und Günther 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 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.

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 Biodie-

sel und Bioethanol am Diesel- bzw. Benzinverbrauch abgeleitet werden. Eine sektorale Zuordnung der Kraftstoffe liefert die BAFA-Statistik nicht. Daher werden in der TREMOD-Berechnung folgende Annahmen getroffen:

- ▶ Bei den Ottokraftstoffen wird der jährlich ermittelte Anteil des Bioethanols für alle Sektoren gleich angenommen.
- ▶ Beim Dieseldieselkraftstoff 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 seit 2014 keine Biokraftstoffe in der Binnenschifffahrt ausweist.
- ▶ Biogas wird seit 2012 in der Energiebilanz des Straßenverkehrs erfasst und wird so in TREMOD übernommen.

Die so ermittelten Absatzzahlen nach Sektoren sind Basis der Emissionsberichterstattung für den Verkehrsbereich. In der folgenden Tabelle 43 ist der Kraftstoffabsatz für die Jahre 1990-2021 entsprechend der hier beschriebenen Zuordnung dargestellt.

Tabelle 43: Kraftstoffabsatz in Deutschland nach Energiebilanz 1990-2021

In PJ

Sektor	1990	2000	2010	2015	2018	2019	2020	2021
Straßenverkehr								
Dieseldieselkraftstoffe								
Dieseldiesel konventionell	736	1.108	1.168	1.349	1.377	1.391	1.240	1.254
Biodieseldiesel Beimischung	0,0	0,0	76	74	80	79	103	87
Biodieseldiesel (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	90	74	80	79	103	87
Dieseldiesel Gesamt	736	1.120	1.258	1.423	1.457	1.470	1.343	1.341
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	1,1%	7,1%	5,2%	5,5%	5,4%	7,7%	6,5%
Ottokraftstoffe								
Otto konventionell	1.330	1.237	791	709	693	700	629	634
Ethanol	0	0	31	31	31	30	29	30
Otto Gesamt	1.330	1.237	822	739	724	730	658	664
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	3,7%	4,2%	4,3%	4,1%	4,4%	4,5%
Andere Kraftstoffe								
CNG			8,8	7,4	5,2	5,8	5,9	6,7
Biogas				1,2	1,4	2,4	3,2	3,2

Sektor	1990	2000	2010	2015	2018	2019	2020	2021
LPG		0,1	22	19	16	15	10	9,5
Schieneverkehr								
Dieselmotoren								
Diesel konventionell	38	25	15	13	9	11	11	11
Biodiesel Beimischung	0,0	0,0	1,0	0,7	0,5	0,6	0,9	0,8
Diesel gesamt	38	25	16	14	10	11	12	12
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	6,1%	5,2%	5,5%	5,4%	7,7%	6,5%
Binnenschifffahrt								
Dieselmotoren								
Diesel konventionell	28	12	11	13	11	11	10	10
Biodiesel Beimischung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Diesel gesamt	28	12	11	13	11	11	10	10
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Sonstige Verbraucher								
Dieselmotoren								
Diesel konventionell	127	96	90	102	102	103	106	107
Biodiesel Beimischung	0,0	0,0	5,9	5,6	5,9	5,9	8,8	7,4
Diesel gesamt	127	96	96	108	108	109	115	114
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	6,1%	5,2%	5,5%	5,4%	7,7%	6,5%
Ottomotoren								
Otto konventionell	30	17	13	13	11	11	12	12
Ethanol	0,0	0,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6
Otto Gesamt	30	17	13	13	12	12	12	12
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	3,7%	4,2%	4,3%	4,1%	4,4%	4,5%
Gesamt								
Dieselmotoren								
Diesel konventionell	929	1.242	1.284	1.478	1.499	1.516	1.367	1.383
Biodiesel Beimischung	0,0	0,0	83	80	87	86	113	95
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	87	86	113	95
Diesel Gesamt	929	1.254	1.380	1.558	1.586	1.602	1.479	1.478

Sektor	1990	2000	2010	2015	2018	2019	2020	2021
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	1,0%	7,0%	5,1%	5,5%	5,4%	7,6%	6,4%
Ottokraftstoffe								
Otto konventionell	1.361	1.254	804	721	704	711	641	646
Ethanol	0,0	0,0	31	31	32	31	29	31
Otto Gesamt	1.361	1.254	835	753	736	742	670	677
Anteil Biokraftstoffe	0,0%	0,0%	3,7%	4,2%	4,3%	4,1%	4,4%	4,5%
Flugverkehr								
Kerosin (in PJ)	193	297	362	362	437	434	200	258
Flugbenzin (in PJ)	2,4	1,1	0,6	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2

Quellen: AG Energiebilanzen, Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, eigene Berechnungen; Stand: 31. August 2022

2.6.1 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 44 dargestellt.

Tabelle 44: Vergleich Verbrauch im Inland und Absatz für Benzin und Diesel im Straßenverkehr 1990-2021

In PJ

Jahr	Benzinverbrauch im Inland	Benzinabsatz im Inland	Differenz Absatz/Verbrauch	Dieselverbrauch im Inland	Dieselabsatz im Inland	Differenz Absatz/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	0,3%
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%	1.013	967	-4,5%
1997	1.253	1.297	3,6%	1.040	983	-5,4%
1998	1.274	1.300	2,1%	1.058	1.027	-3,0%
1999	1.277	1.301	1,8%	1.115	1.102	-1,1%
2000	1.243	1.237	-0,5%	1.152	1.120	-2,8%

Jahr	Benzinverbrauch im Inland	Benzinabsatz im Inland	Differenz Absatz/Verbrauch	Dieselverbrauch im Inland	Dieselabsatz im Inland	Differenz Absatz/Verbrauch
2001	1.229	1.199	-2,5%	1.199	1.114	-7,1%
2002	1.206	1.166	-3,3%	1.238	1.126	-9,1%
2003	1.160	1.109	-4,4%	1.266	1.108	-12,5%
2004	1.132	1.074	-5,1%	1.326	1.150	-13,3%
2005	1.065	999	-6,2%	1.337	1.151	-13,9%
2006	1.033	944	-8,6%	1.386	1.213	-12,5%
2007	1.006	905	-10,1%	1.433	1.218	-15,0%
2008	971	870	-10,4%	1.427	1.212	-15,0%
2009	964	853	-11,5%	1.391	1.205	-13,4%
2010	944	822	-12,9%	1.426	1.258	-11,8%
2011	933	820	-12,1%	1.460	1.281	-12,3%
2012	903	775	-14,2%	1.467	1.310	-10,7%
2013	880	773	-12,1%	1.498	1.360	-9,3%
2014	869	777	-10,6%	1.549	1.377	-11,1%
2015	831	739	-11,0%	1.592	1.423	-10,7%
2016	822	740	-10,0%	1.639	1.467	-10,4%
2017	822	750	-8,8%	1.674	1.502	-10,3%
2018	825	724	-12,3%	1.690	1.457	-13,8%
2019	836	730	-12,7%	1.687	1.470	-12,8%
2020	731	658	-9,9%	1.499	1.343	-10,4%
2021	721	664	-7,9%	1.512	1.341	-11,3%

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

Quelle: TREMOD 6.41 vom 15.09.2022, AG Energiebilanzen, BAFA

Der Vergleich zeigt, dass der Inlandsverbrauch aller Kraftstoffe zwischen 1994 und 1999 nahe den Absatzzahlen 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 Binnenschifffahrt wird sowohl in der Energiebilanz als auch in der Emissionsberichterstattung anders abgegrenzt als in TREMOD. Die Energiebilanz enthält neben der Binnenschifffahrt zusätzlich die Küstenschifffahrt. Im Emissionsinventar wird dagegen die nationale Binnen- und Seeschifffahrt, ähnlich wie beim Flugverkehr, erfasst (Gniffke und Günther 2022). Daher wird, anders als in früheren TREMOD-Berichten, kein Vergleich der TREMOD-Ergebnisse mit der Energiebilanz vorgenommen.

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 45: Anpassungsfaktoren Kraftstoffabsatz Energiebilanz / Inlandsverbrauch TREMOD 1990-2021

Absatz Energiebilanz / Inlandsverbrauch (in PJ/PJ)

	Straße, Kfz<=3,5t Otto+Diesel	Straße, Kfz>3,5t	Diesel Bahn
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
1995	1,05	0,93	1,04
1996	1,04	0,90	1,03
1997	1,04	0,89	1,03
1998	1,02	0,94	1,05

	Straße, Kfz<=3,5t Otto+Diesel	Straße, Kfz>3,5t	Diesel Bahn
1999	1,02	0,97	1,06
2000	1,00	0,96	1,08
2001	0,98	0,89	1,03
2002	0,97	0,86	1,13
2003	0,96	0,81	1,12
2004	0,95	0,79	1,06
2005	0,94	0,78	0,95
2006	0,91	0,84	0,96
2007	0,90	0,80	0,98
2008	0,90	0,80	0,92
2009	0,88	0,85	0,88
2010	0,87	0,89	0,88
2011	0,88	0,87	0,90
2012	0,86	0,93	0,83
2013	0,88	0,94	0,76
2014	0,89	0,88	0,82
2015	0,89	0,90	0,87
2016	0,90	0,89	0,89
2017	0,91	0,88	0,72
2018	0,88	0,84	0,59
2019	0,87	0,87	0,73
2020	0,90	0,89	0,76
2021	0,92	0,85	0,75

Quelle: TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

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 2021 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.

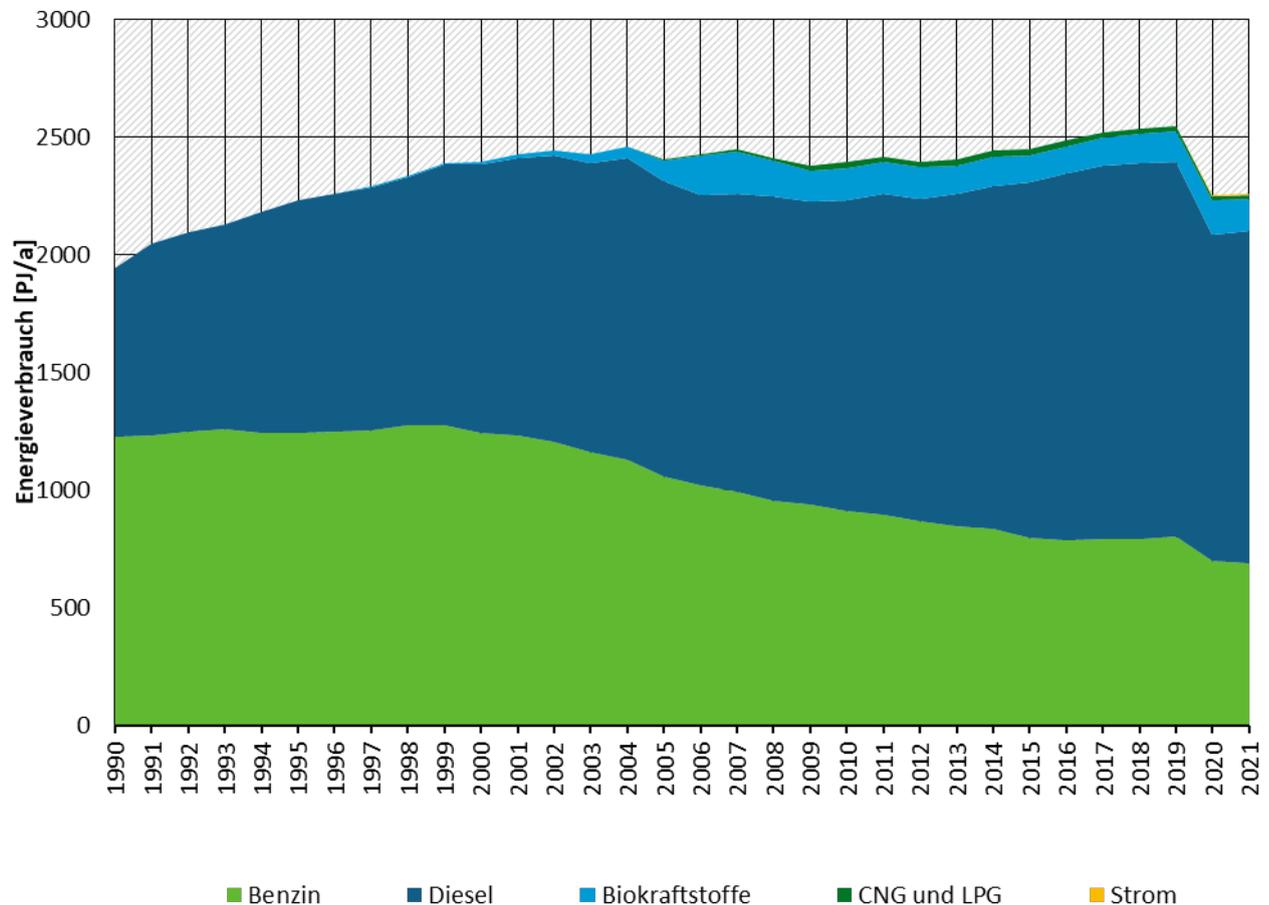
2.7.1.1 Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs nach Energieträgern

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 (CNG und LNG) und Flüssiggas (LPG) sowie Strom (Kraftfahrzeuge ohne Pe-delecs). Danach zeigen sich bei den Energieträgern folgende Entwicklungen:

- ▶ Im Jahr 1990 dominierte der Verbrauch von Benzin. In den Folgejahren nahm der Dieserverbrauch zu, während der Benzinverbrauch zunächst nahezu gleich blieb und ab dem Jahr 2000 zurückging. Der Dieserverbrauch lag im Jahr 2019 um 122 % bzw. im Jahr 2021 um 96 % 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 % (2021: 5,9%) am Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs.
- ▶ CNG 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 2021 aber immer noch deutlich unter 1 %.

Insgesamt nahm der Energieverbrauch des Straßenverkehrs von 1990 bis 2019 um 31 % zu. Im Jahr 2020 sank der Energieverbrauch infolge der Auswirkungen der COVID-19 Pandemie und stieg 2021 nur leicht an.

Abbildung 12: Energieverbrauch des Straßenverkehrs in Deutschland nach Energieträgern - Entwicklung des Endenergieverbrauchs bis 2021



Anmerkungen: Endenergieverbrauch im Inland
Quelle: TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

2.7.1.2 Endenergieverbrauch aller Verkehrsträger

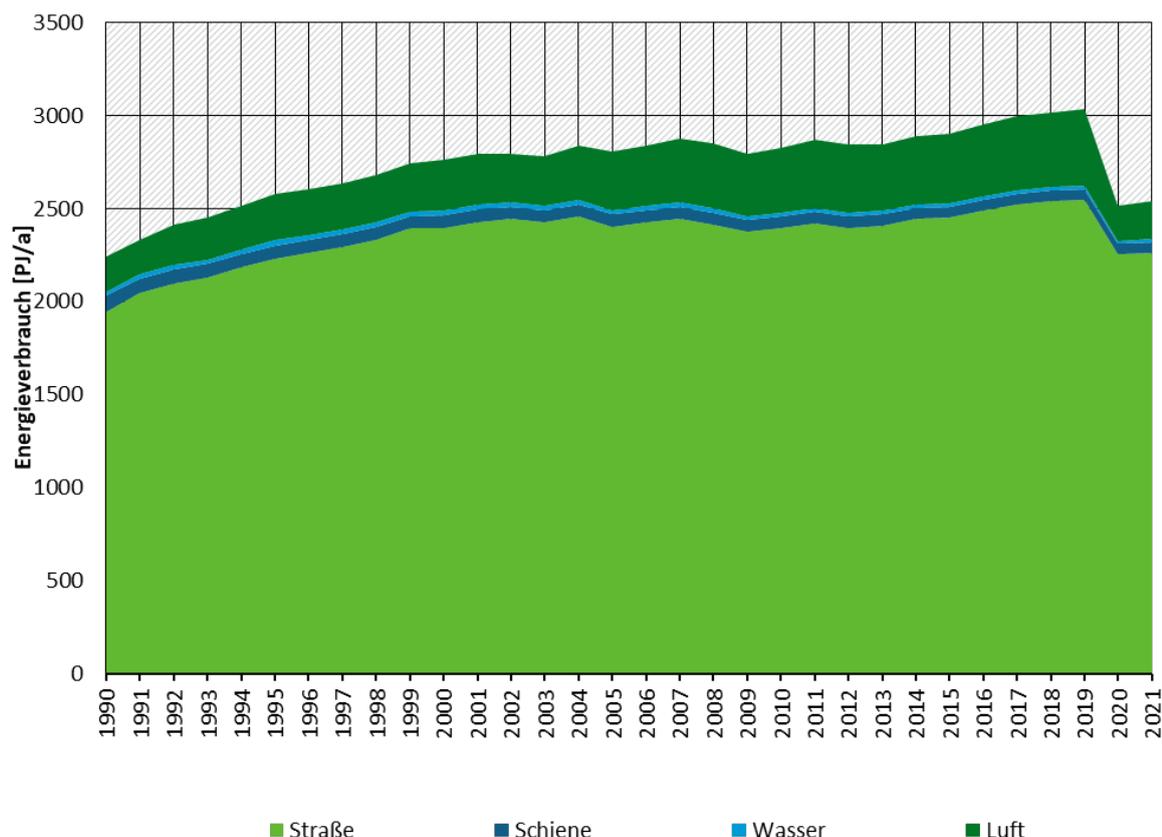
Abbildung 13 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2021 für die Verkehrsträger Straße (Straßenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen sowie Bussen auf inländischem Territorium), Schiene (Eisenbahn, Straßen-, Stadt- 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 89 % im Jahr 2021), gefolgt vom Flugverkehr. Der Energieverbrauch des Straßenverkehrs nahm von 1990 bis 2019 um 31 % bzw. bis 2021 um 16 % 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.
- ▶ Bei der Bahn ging der Energieverbrauch von 1990 bis 2021 um 30 % zurück.

► Bei der Binnenschifffahrt ging der Energieverbrauch von 1990 bis 2021 um 31 % zurück.

Der gesamte Energieverbrauch aller betrachteten Verkehrsträger nahm von 1990 bis 2019 um 32 % bzw. bis 2021 um 13 % 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 2021



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).

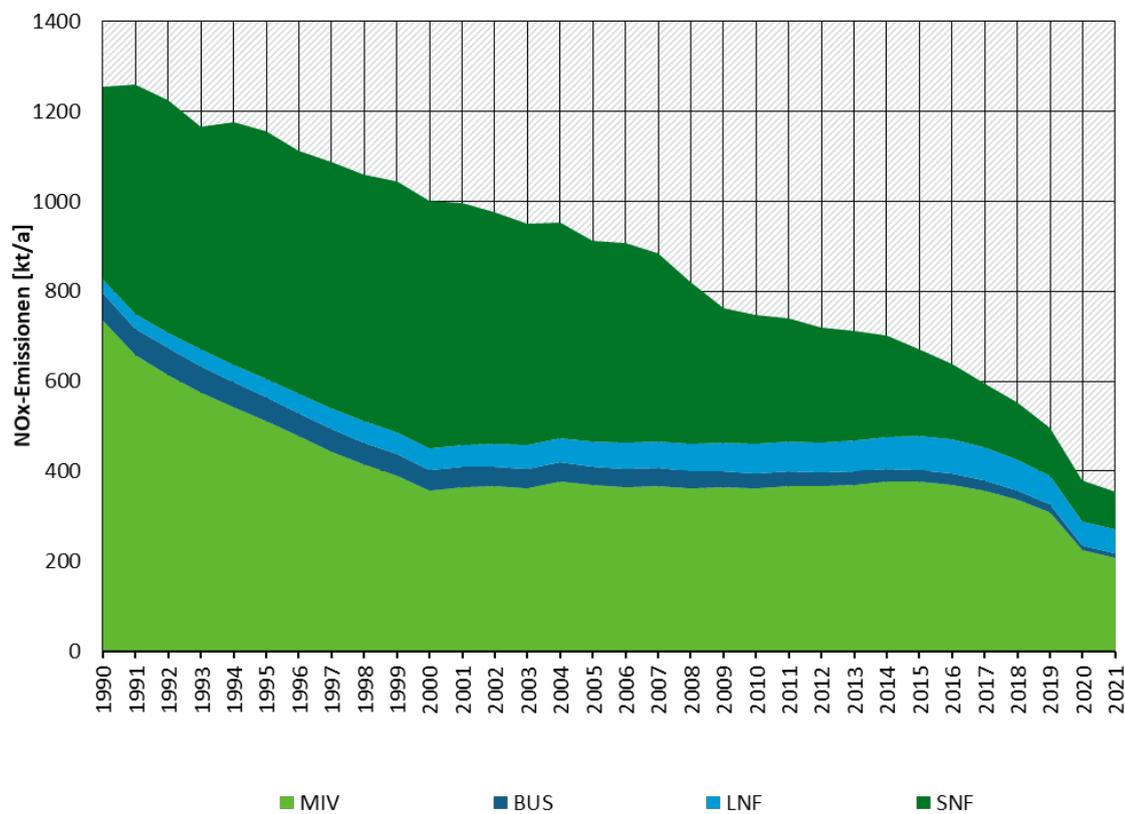
Quelle: TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

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. Inse-

samt nahmen die Stickstoffoxidemissionen von 1.260 Kilotonnen im Jahr 1991 auf 496 Kilotonnen im Jahr 2019 und damit um 61 % ab. 2021 waren es noch 353 Kilotonnen und damit 29 % weniger als 2019.

Abbildung 14: Stickstoffoxidemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen bis 2021

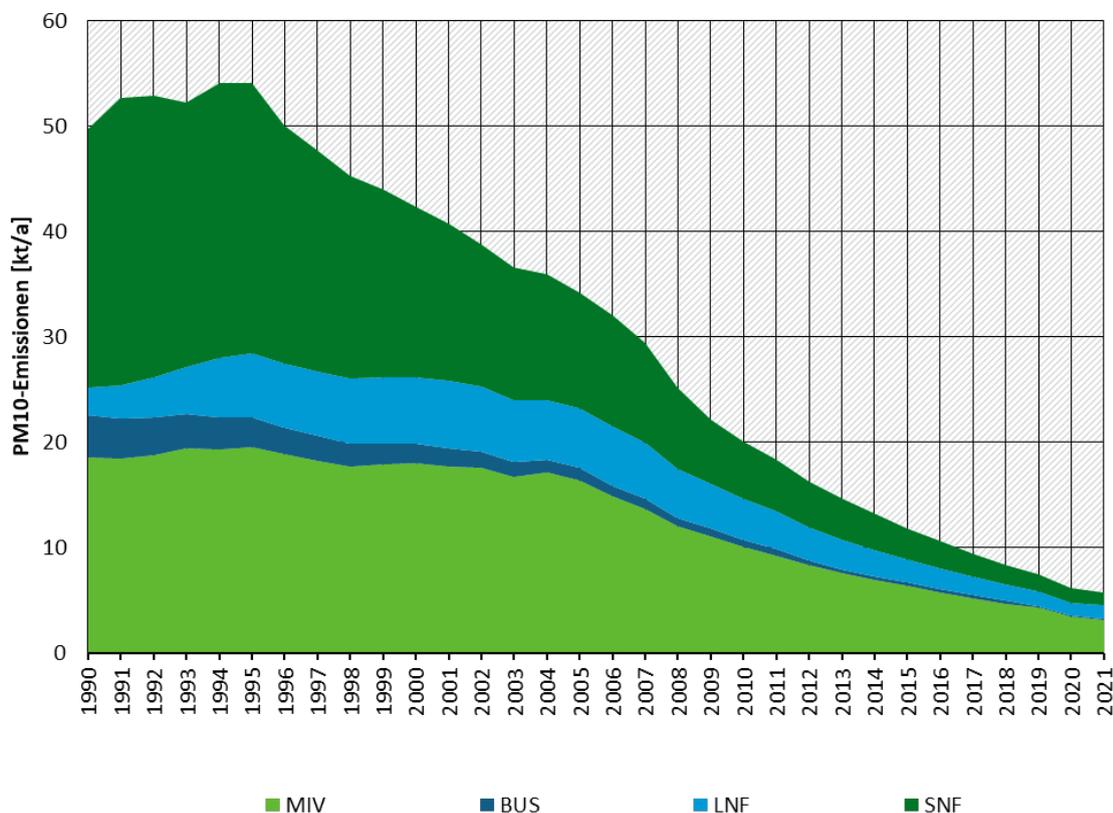


Anmerkungen: Direkte Abgasemissionen im Inland.

Quelle: TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

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 7,5 Kilotonnen im Jahr 2019 und damit um 84 % ab. 2021 waren es mit 5,7 Kilotonnen 24 % weniger als 2019.

Abbildung 15: Abgaspartikelemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen bis 2021



Anmerkungen: Direkte Abgasemissionen im Inland
Quelle: TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

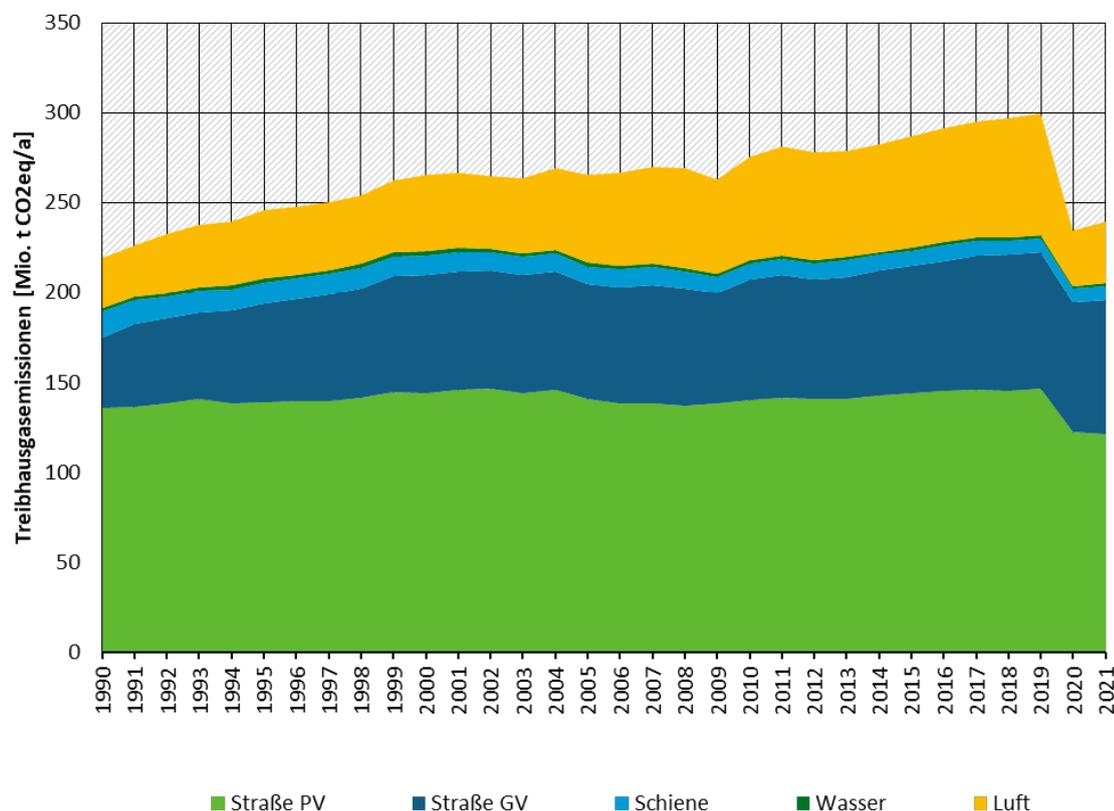
2.7.1.4 Treibhausgasemissionen des Verkehrs nach Territorialprinzip

Abbildung 16 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2021 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 82 % Anteil im Jahr 2021), gefolgt vom Flugverkehr. Die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs nahmen von 1990 bis 2019 um 27 % und bis 2021 um 12 % zu.
- ▶ Der Flugverkehr nahm von 1990 bis 2019 um 143 % und bis 2021 um 23 % zu.
- ▶ Bei der Bahn gingen die Treibhausgasemissionen von 1990 bis 2019 um 47 % und bis 2021 um 48 % zurück.
- ▶ Bei der Binnenschifffahrt gingen die Treibhausgasemissionen von 1990 bis 2019 um 28 % und bis 2021 um 29 % zurück.

Die Treibhausgasemissionen nahmen insgesamt für alle betrachteten Verkehrsträger von 1990 bis 2019 um 33 % und bis 2021 um 9 % zu.

Abbildung 16: Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung der Gesamtemissionen bis 2021



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).

Quelle: TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

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 Seeverkehr³ und die Binnenschifffahrt gemäß Energiebilanz.

³ 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).

- ▶ Der Straßenverkehr enthält zusätzlich die CO₂-Emissionen aus der gewollten Mitverbrennung von im Zweitaktergemisch enthaltenen Schmierölen.⁴
- ▶ Der Schienenverkehr enthält zusätzlich die Emissionen aus Festbrennstoffen.
- ▶ 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.

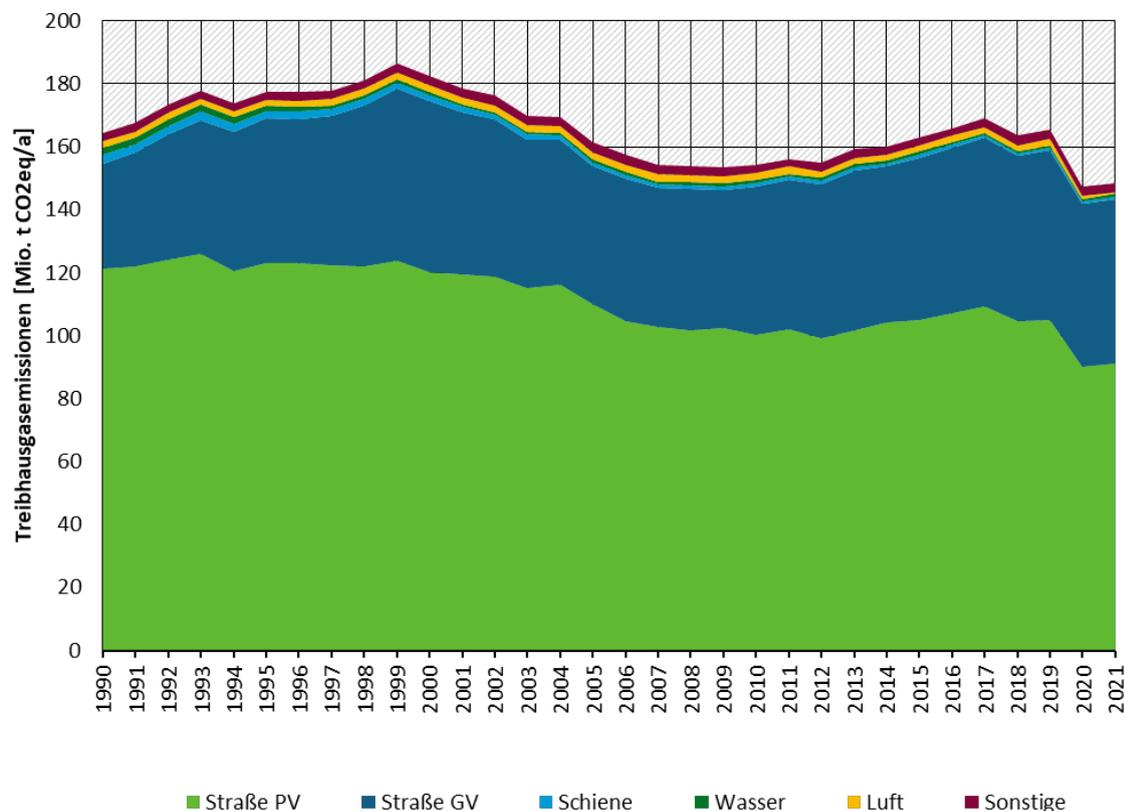
Abbildung 17 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2021 für die Verkehrsträger Straße PV (Straßenpersonenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw und Bussen), Straße GV (Straßengüterverkehr mit leichten und schweren Nutzfahrzeugen, Schiene (Eisenbahn, 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 2021). Insgesamt lagen die THG-Emissionen des Straßenverkehrs im Jahr 2019 um 3 % über dem Niveau von 1990 und 2021 um 7 % unter dem Niveau von 1990, während bei den THG-Gesamtemissionen in der TREMOD-Abgrenzung eine Steigerung um 27 % (2019) bzw. 12 % (2021) 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 0,5 % gestiegen und bis 2021 um 10 % gesunken, während sie in der TREMOD-Abgrenzung um 33% bzw. bis 2021 um 9% angestiegen sind (siehe Kapitel 2.7.1.4). Die Unterschiede ergeben sich aus den bereits am Anfang des Kapitels genannten Gründen.

⁴ 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.

Abbildung 17: Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung bis 2021 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 6.41 vom 15.09.2022; Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 – 2020; Stand EU-Submission: 15.01.2022; 2021 vorläufig

2.7.2 Ursachen für Änderungen gegenüber der Version 6.21

In diesem Kapitel werden wichtige Ergebnisse der TREMOD-Versionen 6.41 vom 15.09.2022 dargestellt, erläutert und der vorigen Version 6.21 vom 02.09.2021 gegenübergestellt. Im Fokus stehen hierbei die Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern sowie die Entwicklung der Stickstoffoxid- und Partikelemissionen. Unterschiede zwischen den Versionen ergeben sich aus z. T. leicht geänderten Verkehrsmengengerüsten, d.h. den Fahrleistungen und den spezifischen Verbrauchs- und Emissionsfaktoren des HBEFA 4.2 im Straßenverkehr. Da das Jahr 2021 in TREMOD 6.21 kein Realjahr war, werden nur die Jahre bis 2020 verglichen.

2.7.2.1 Fahrleistungen Straßenverkehr

In TREMOD 6.41 wurden die Fahrleistungen gegenüber TREMOD 6.21 aufgrund aktueller Quellen geändert (siehe Kapitel 2.2.2). Außerdem wurden Entwicklungen in der Zeitreihe rückwirkend darauf angepasst und z. T. bereinigt. Folgende Änderungen sind zu beobachten:

- ▶ Bei Pkw, motorisierten Zweirädern und leichten Nutzfahrzeugen wurden nur die Fahrleistungen des Jahres 2020 auf den neuesten Stand angepasst.

- ▶ Bei den Bussen wurden die methodischen Änderungen auf die gesamte Zeitreihe übertragen. Dies führt zu Änderungen in den Jahren 2005 bis 2011. Im Jahr 2020 wurden die Fahrleistungen an die aktuellen Werte und Annahmen angepasst
- ▶ Die Fahrleistungen der SNF wurden in der Zeitreihe überarbeitet. Zum einen wurde die Verteilung zwischen der Last- und Sattelzugfahrleistung anhand aktueller Quellen angepasst (siehe Kapitel 2.2.2.2). Zum anderen wurde die Verteilung der Fahrleistungen auf die Straßenkategorien überarbeitet (Plausibilisierung der Fahrleistungsentwicklung auf dem nachgeordneten Netz, siehe Kapitel 2.2.2.3). Dadurch ergibt sich in verschiedenen Jahren eine Änderung der Gesamtfahrleistung.

Tabelle 46: Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 – Fahrleistungen

Unterschied Gesamtfahrleistung nach Fahrzeugkategorien und gesamt in Prozent

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1991	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1992	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1993	0,0%	0,0%	0,0%	-1,6%	0,0%	0,0%	0,0%
1994	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,6%	0,0%
1995	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,5%	0,0%
1996	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,5%	0,0%
1997	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,4%	0,0%
1998	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,4%	0,0%
1999	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,4%	0,0%
2000	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,3%	0,0%
2001	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,3%	0,0%
2002	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,3%	0,0%
2003	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,2%	0,0%
2004	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,2%	0,0%
2005	0,0%	0,0%	0,0%	0,8%	0,0%	-0,2%	0,0%
2006	0,0%	0,0%	0,0%	0,7%	0,0%	-0,5%	0,0%
2007	-0,1%	0,0%	0,0%	0,7%	0,0%	-0,8%	0,0%
2008	-0,1%	0,0%	0,0%	0,6%	0,0%	-1,2%	0,0%
2009	-0,1%	0,0%	0,0%	0,6%	0,0%	-1,6%	0,0%
2010	-0,1%	0,0%	0,0%	0,7%	0,0%	-1,9%	0,0%
2011	-0,1%	0,0%	0,0%	0,7%	0,0%	-1,7%	0,0%
2012	-0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-1,6%	0,0%

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2013	-0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-1,4%	0,0%
2014	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2015	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%
2016	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,5%	0,0%
2017	0,2%	0,0%	-0,1%	0,0%	0,0%	3,1%	0,0%
2018	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,1%	0,0%
2019	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,7%	0,0%
2020	-0,7%	-0,8%	0,6%	-19,2%	-1,4%	1,9%	-8,8%

Quelle: TREMOD 6.21 vom 02.09.2021 und TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

2.7.2.2 Energieverbrauch Straßenverkehr

Der Energieverbrauch hat sich bei allen Fahrzeugkategorien durch die Übernahme des HBEFA 4.2 geändert. Die folgende Tabelle zeigt die Änderung des spezifischen Energieverbrauchs der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD Version 6.21 je Fahrzeugkategorie.

Tabelle 47: Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 – spezifischer Energieverbrauch

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

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	-1,8%	-3,5%	-0,8%	0,0%	21,0%	0,1%	16,4%
1991	-1,7%	-3,5%	-0,8%	0,0%	21,5%	0,1%	16,7%
1992	-1,5%	-3,3%	-0,7%	-0,1%	22,1%	0,1%	17,0%
1993	-1,3%	-3,1%	-0,7%	-0,4%	22,3%	0,1%	15,1%
1994	-1,0%	-2,9%	-0,6%	0,0%	23,4%	0,3%	12,5%
1995	-0,8%	-2,8%	-0,6%	0,0%	23,8%	0,3%	12,5%
1996	-0,7%	-2,7%	-0,5%	0,0%	23,9%	0,3%	12,5%
1997	-0,6%	-2,7%	-0,5%	0,0%	23,9%	0,3%	12,4%
1998	-0,5%	-2,6%	-0,5%	0,0%	23,7%	0,3%	12,4%
1999	-0,4%	-2,4%	-0,5%	0,0%	23,3%	0,3%	12,5%
2000	-0,1%	-2,2%	-0,4%	0,0%	22,9%	0,2%	13,0%
2001	0,0%	-2,0%	-0,4%	0,0%	21,8%	0,2%	12,1%
2002	0,0%	-1,8%	-0,4%	0,0%	19,8%	0,2%	11,7%
2003	0,0%	-1,6%	-0,4%	-0,1%	17,5%	0,2%	11,2%
2004	0,0%	-1,4%	-0,4%	0,0%	15,2%	0,2%	10,6%
2005	0,1%	-1,3%	-0,4%	-0,1%	13,2%	0,2%	10,5%

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2006	-0,1%	-1,2%	-0,4%	-0,2%	11,7%	0,3%	4,7%
2007	-0,2%	-1,2%	-0,3%	-0,1%	10,2%	0,3%	4,5%
2008	-0,3%	-1,1%	-0,3%	-0,1%	8,5%	0,3%	4,1%
2009	-0,4%	-1,1%	-0,3%	-0,2%	7,6%	0,4%	3,8%
2010	-0,4%	-1,0%	-0,2%	-0,1%	6,9%	0,4%	3,5%
2011	-0,4%	-0,9%	-0,2%	-0,1%	6,2%	0,4%	3,3%
2012	-0,3%	-0,8%	-0,1%	-0,1%	5,7%	0,4%	3,0%
2013	-0,3%	-0,7%	0,0%	-0,1%	5,4%	0,3%	2,8%
2014	0,0%	-0,6%	0,0%	0,1%	5,0%	0,1%	2,5%
2015	0,1%	-0,5%	0,1%	-0,2%	4,8%	0,1%	2,3%
2016	0,4%	-0,4%	0,1%	-0,3%	4,5%	0,1%	2,2%
2017	0,8%	-0,1%	0,1%	0,0%	4,0%	0,2%	2,2%
2018	1,2%	0,1%	0,1%	0,6%	3,3%	0,4%	2,3%
2019	1,1%	0,1%	0,0%	0,8%	2,9%	1,8%	2,4%
2020	1,0%	0,2%	-0,4%	3,7%	2,8%	1,4%	3,6%

Quelle: TREMOD 6.21 vom 02.09.2021 und TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

Der gesamte Energieverbrauch des Inlandsverkehrs ergibt sich aus dem Produkt der Fahrleistungen und der spezifischen Energieverbrauchswerte (Tabelle 48).

Tabelle 48: TREMOD-Version 6.41 – 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	50	106	529	37
1996	2.260	1.496	20	49	113	543	38
1997	2.293	1.497	22	49	120	567	38
1998	2.333	1.516	23	49	127	580	38
1999	2.392	1.540	24	49	136	605	39
2000	2.396	1.533	24	49	143	609	37

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2001	2.429	1.558	24	49	150	608	40
2002	2.445	1.573	25	49	151	607	40
2003	2.426	1.549	25	49	149	614	40
2004	2.458	1.578	25	51	147	617	40
2005	2.404	1.537	25	51	149	601	40
2006	2.426	1.543	25	52	152	633	21
2007	2.447	1.546	25	52	153	652	20
2008	2.413	1.527	24	53	151	640	18
2009	2.376	1.548	24	54	150	582	18
2010	2.394	1.548	23	54	150	601	18
2011	2.419	1.562	22	54	150	612	18
2012	2.397	1.552	22	55	151	600	18
2013	2.406	1.555	21	55	152	606	18
2014	2.446	1.574	21	55	161	617	18
2015	2.450	1.560	21	57	169	626	17
2016	2.486	1.574	21	59	176	639	17
2017	2.521	1.586	21	58	183	655	16
2018	2.539	1.584	21	58	190	669	16
2019	2.546	1.593	21	59	195	662	16
2020	2.252	1.350	21	39	183	645	14

Quelle: TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

Die Änderung des Inlandsverbrauchs der TREMOD-Version 6.41 gegenüber der Version 6.21 ist in Tabelle 49 dargestellt.

Tabelle 49: Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 – Energieverbrauch Inland

Unterschied gesamter Energieverbrauch in PJ nach Fahrzeugkategorien und gesamt in Prozent

Jahr	EV gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	-1,80%	-3,47%	-0,82%	-0,03%	21,04%	0,13%	16,40%
1991	-1,67%	-3,48%	-0,76%	-0,05%	21,55%	0,12%	16,68%
1992	-1,45%	-3,27%	-0,73%	-0,07%	22,07%	0,13%	16,99%
1993	-1,33%	-3,13%	-0,67%	-1,99%	22,30%	0,14%	15,09%
1994	-1,07%	-2,94%	-0,64%	-0,04%	23,36%	-0,24%	12,52%
1995	-0,87%	-2,79%	-0,58%	-0,01%	23,81%	-0,22%	12,51%

Jahr	EV gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1996	-0,74%	-2,71%	-0,54%	-0,01%	23,90%	-0,19%	12,48%
1997	-0,64%	-2,67%	-0,50%	-0,02%	23,91%	-0,16%	12,44%
1998	-0,55%	-2,61%	-0,48%	-0,02%	23,72%	-0,13%	12,45%
1999	-0,38%	-2,43%	-0,46%	-0,02%	23,31%	-0,10%	12,46%
2000	-0,16%	-2,19%	-0,44%	-0,03%	22,93%	-0,08%	13,04%
2001	-0,04%	-1,99%	-0,43%	-0,04%	21,79%	-0,05%	12,09%
2002	0,00%	-1,80%	-0,43%	-0,05%	19,79%	-0,03%	11,65%
2003	0,01%	-1,63%	-0,44%	-0,06%	17,48%	0,00%	11,21%
2004	0,00%	-1,45%	-0,45%	-0,05%	15,18%	0,02%	10,63%
2005	0,05%	-1,33%	-0,43%	0,73%	13,20%	0,07%	10,47%
2006	-0,16%	-1,23%	-0,38%	0,50%	11,66%	-0,26%	4,70%
2007	-0,28%	-1,19%	-0,35%	0,56%	10,19%	-0,56%	4,49%
2008	-0,41%	-1,11%	-0,30%	0,54%	8,55%	-0,86%	4,10%
2009	-0,51%	-1,05%	-0,26%	0,47%	7,63%	-1,23%	3,81%
2010	-0,57%	-0,96%	-0,21%	0,52%	6,87%	-1,49%	3,53%
2011	-0,51%	-0,89%	-0,17%	0,58%	6,20%	-1,31%	3,27%
2012	-0,47%	-0,79%	-0,09%	-0,13%	5,72%	-1,24%	3,00%
2013	-0,39%	-0,69%	-0,02%	-0,12%	5,35%	-1,08%	2,75%
2014	-0,04%	-0,62%	0,04%	0,11%	5,04%	0,07%	2,47%
2015	0,10%	-0,50%	0,10%	-0,23%	4,83%	0,38%	2,30%
2016	0,51%	-0,35%	0,10%	-0,29%	4,51%	1,66%	2,18%
2017	1,05%	-0,13%	0,02%	0,01%	3,95%	3,29%	2,17%
2018	1,48%	0,06%	0,07%	0,61%	3,34%	4,58%	2,29%
2019	1,22%	0,15%	0,04%	0,77%	2,93%	3,44%	2,40%
2020	0,29%	-0,61%	0,20%	-16,18%	1,36%	3,32%	-5,60%

Quelle: TREMOD 6.21 vom 02.09.2021 und TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

Wesentliche Änderungen finden sich bei den leichten Nutzfahrzeugen in der gesamten Zeitreihe und bei den schweren Nutzfahrzeugen ab 2016.

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 50).

Tabelle 50: TREMOD-Version 6.41 – NO_x-Emissionsfaktoren

In g/km

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	2,230	1,485	0,145	14,416	2,119	11,925	3,093
1991	2,180	1,303	0,174	14,789	2,090	11,815	3,090
1992	2,064	1,178	0,203	15,125	2,066	11,733	3,063
1993	1,926	1,079	0,201	14,947	2,030	11,416	3,162
1994	1,918	1,012	0,207	14,526	1,872	11,615	3,472
1995	1,847	0,941	0,208	13,767	1,802	11,153	3,402
1996	1,756	0,872	0,207	13,056	1,760	10,579	3,301
1997	1,696	0,804	0,208	12,540	1,723	10,279	3,236
1998	1,620	0,739	0,209	12,168	1,671	10,006	3,171
1999	1,558	0,679	0,206	11,766	1,595	9,802	3,116
2000	1,484	0,616	0,199	11,481	1,514	9,555	2,962
2001	1,447	0,617	0,201	11,164	1,468	9,307	3,102
2002	1,400	0,613	0,199	10,785	1,466	8,918	3,038
2003	1,371	0,611	0,200	10,292	1,487	8,536	2,940
2004	1,349	0,624	0,198	10,183	1,522	8,272	2,932
2005	1,318	0,620	0,194	9,927	1,548	7,997	2,885
2006	1,301	0,620	0,195	9,614	1,571	7,592	4,163
2007	1,257	0,621	0,190	9,255	1,600	6,906	4,000
2008	1,172	0,615	0,183	8,769	1,636	5,986	3,826
2009	1,079	0,607	0,174	8,459	1,660	5,391	3,695
2010	1,049	0,599	0,169	7,994	1,673	5,010	3,520
2011	1,023	0,599	0,165	7,640	1,685	4,650	3,350
2012	0,991	0,597	0,160	7,046	1,679	4,366	3,217
2013	0,972	0,598	0,154	6,789	1,674	4,129	3,086
2014	0,940	0,599	0,150	6,403	1,658	3,736	2,953
2015	0,888	0,591	0,144	5,985	1,641	3,160	2,770
2016	0,830	0,574	0,140	5,479	1,596	2,630	2,588
2017	0,767	0,549	0,136	4,896	1,484	2,212	2,288
2018	0,707	0,519	0,130	4,361	1,340	1,889	2,003
2019	0,633	0,471	0,124	3,921	1,205	1,619	1,767

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2020	0,557	0,403	0,117	3,686	1,066	1,414	1,587

Quelle: TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

Tabelle 51 stellt die Unterschiede der Stickstoffoxidemissionsfaktoren der TREMOD-Version 6.41 gegenüber der Version 6.21 dar. Die Unterschiede ergeben sich vor allem aus der Aktualisierung der Emissionsfaktoren des HBEFA 4.2. Die größten Änderungen gibt es bei den schweren Nutzfahrzeugen ab dem Jahr 2008 aufgrund der überarbeiteten Emissionsmodellierung und der verbesserten Datenbasis für neue Fahrzeuge (Euro-VI) im HBEFA 4.2.

Tabelle 51: Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 – 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	0,2%	0,1%	-2,4%	0,4%	0,4%	0,3%	2,1%
1991	0,2%	0,1%	-2,5%	0,3%	0,4%	0,3%	2,1%
1992	0,2%	0,1%	-2,7%	0,2%	0,4%	0,3%	2,2%
1993	0,1%	0,0%	-2,6%	0,0%	0,0%	0,3%	1,2%
1994	0,1%	0,0%	-2,6%	0,3%	0,4%	0,5%	0,7%
1995	0,1%	0,1%	-2,4%	0,4%	0,7%	0,5%	0,7%
1996	0,1%	0,1%	-2,3%	0,4%	0,7%	0,4%	0,6%
1997	0,1%	0,2%	-2,2%	0,4%	0,8%	0,4%	0,6%
1998	0,2%	0,2%	-2,1%	0,4%	0,7%	0,4%	0,5%
1999	0,2%	0,2%	-2,0%	0,4%	0,7%	0,4%	0,5%
2000	0,2%	0,2%	-2,0%	0,3%	0,7%	0,4%	0,5%
2001	0,2%	0,2%	-2,0%	0,3%	0,6%	0,4%	0,4%
2002	0,2%	0,2%	-2,0%	0,3%	0,6%	0,3%	0,3%
2003	0,2%	0,2%	-2,0%	0,2%	0,5%	0,3%	0,3%
2004	0,1%	0,2%	-2,0%	0,2%	0,5%	0,3%	0,2%
2005	0,2%	0,2%	-2,0%	0,2%	0,4%	0,3%	0,2%
2006	0,1%	0,2%	-1,8%	1,0%	0,6%	0,3%	0,4%
2007	0,2%	0,2%	-1,6%	1,1%	0,7%	0,7%	0,3%
2008	0,6%	0,2%	-1,4%	1,1%	0,9%	1,8%	0,3%
2009	1,0%	0,1%	-1,2%	1,1%	1,0%	3,3%	0,2%
2010	1,7%	0,0%	-1,0%	1,3%	1,1%	5,7%	0,1%
2011	2,4%	-0,2%	-0,8%	1,5%	1,2%	7,9%	0,0%

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2012	2,9%	-0,3%	-0,4%	4,0%	1,3%	9,9%	0,0%
2013	3,5%	-0,5%	-0,1%	4,7%	1,4%	12,4%	0,0%
2014	4,3%	-0,6%	0,2%	7,5%	1,4%	14,7%	-0,1%
2015	3,8%	-0,4%	0,5%	1,6%	1,4%	15,0%	-0,1%
2016	3,1%	-0,6%	0,4%	0,2%	1,3%	13,5%	0,0%
2017	2,7%	-0,6%	0,5%	3,1%	1,2%	11,2%	0,0%
2018	2,6%	-0,3%	0,3%	10,4%	1,1%	8,4%	0,0%
2019	0,3%	-2,1%	0,3%	11,9%	1,1%	4,5%	-0,1%
2020	-2,8%	-5,3%	-0,2%	17,0%	1,0%	0,2%	-0,4%

Quelle: TREMOD 6.21 vom 02.09.2021 und TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

Tabelle 52 zeigt die mit TREMOD Version 6.41 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 52: TREMOD-Version 6.41 – 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	57	40	523	24
1995	1.155	500	3	54	42	533	24
1996	1.113	467	3	51	44	525	23
1997	1.087	432	3	50	45	533	23
1998	1.059	405	3	49	46	533	23
1999	1.045	379	3	47	48	545	23
2000	1.001	345	3	46	48	537	21
2001	995	352	3	45	49	522	23
2002	976	355	3	44	51	500	23
2003	950	351	3	42	52	479	22
2004	952	366	3	42	54	464	23
2005	913	356	3	41	56	434	22

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2006	907	360	3	40	58	433	13
2007	885	363	3	39	61	407	12
2008	822	357	3	37	63	351	11
2009	763	359	3	35	64	291	11
2010	748	356	3	34	66	280	10
2011	741	362	2	32	67	267	10
2012	719	362	2	30	67	248	9
2013	711	366	2	29	68	237	9
2014	701	373	2	27	71	219	8
2015	672	372	2	26	74	189	8
2016	637	366	2	25	76	161	7
2017	596	353	2	22	74	139	6
2018	551	333	2	20	70	122	5
2019	496	304	2	18	65	103	5
2020	380	221	2	11	54	88	4

Quelle: TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

Tabelle 53 zeigt die Differenz der Stickstoffoxidemissionen der Version 6.41 gegenüber der Version 6.21.

Tabelle 53: Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 –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	0,18%	0,08%	-2,38%	0,35%	0,37%	0,27%	2,08%
1991	0,18%	0,06%	-2,54%	0,27%	0,37%	0,26%	2,11%
1992	0,18%	0,05%	-2,68%	0,21%	0,36%	0,27%	2,15%
1993	0,06%	0,00%	-2,63%	-1,61%	-0,01%	0,31%	1,16%
1994	0,03%	0,05%	-2,60%	0,31%	0,38%	-0,06%	0,66%
1995	0,07%	0,11%	-2,43%	0,38%	0,74%	-0,06%	0,66%
1996	0,09%	0,13%	-2,30%	0,38%	0,75%	-0,03%	0,62%
1997	0,11%	0,15%	-2,18%	0,39%	0,75%	0,00%	0,58%
1998	0,13%	0,17%	-2,11%	0,38%	0,74%	0,02%	0,54%
1999	0,14%	0,18%	-2,02%	0,37%	0,71%	0,04%	0,51%
2000	0,15%	0,20%	-1,99%	0,35%	0,70%	0,06%	0,48%

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2001	0,15%	0,20%	-1,96%	0,31%	0,65%	0,06%	0,36%
2002	0,14%	0,20%	-1,97%	0,28%	0,58%	0,06%	0,31%
2003	0,14%	0,19%	-2,02%	0,24%	0,52%	0,06%	0,26%
2004	0,13%	0,19%	-2,04%	0,23%	0,47%	0,06%	0,22%
2005	0,19%	0,19%	-1,98%	1,05%	0,44%	0,09%	0,17%
2006	0,09%	0,21%	-1,78%	1,69%	0,61%	-0,21%	0,35%
2007	0,13%	0,22%	-1,61%	1,72%	0,73%	-0,17%	0,33%
2008	0,50%	0,17%	-1,38%	1,73%	0,88%	0,66%	0,30%
2009	0,87%	0,14%	-1,19%	1,73%	1,00%	1,71%	0,21%
2010	1,54%	0,02%	-0,97%	1,96%	1,14%	3,68%	0,11%
2011	2,23%	-0,16%	-0,76%	2,18%	1,23%	6,06%	0,03%
2012	2,78%	-0,34%	-0,42%	4,05%	1,35%	8,12%	-0,01%
2013	3,43%	-0,48%	-0,09%	4,69%	1,42%	10,79%	-0,02%
2014	4,28%	-0,58%	0,17%	7,51%	1,39%	14,69%	-0,10%
2015	3,85%	-0,40%	0,46%	1,57%	1,37%	15,23%	-0,08%
2016	3,25%	-0,61%	0,43%	0,18%	1,26%	15,25%	0,01%
2017	2,98%	-0,57%	0,33%	3,05%	1,18%	14,61%	0,00%
2018	2,92%	-0,28%	0,35%	10,45%	1,12%	12,91%	-0,02%
2019	0,42%	-2,12%	0,28%	11,89%	1,07%	6,20%	-0,07%
2020	-3,46%	-6,05%	0,40%	-5,47%	-0,38%	2,10%	-9,17%

Quelle TREMOD 6.21 vom 02.09.2021 und TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

2.7.2.4 Stickstoffdioxidemissionen

Die spezifischen Stickstoffdioxidemissionen sind abhängig vom Fahrzeugkonzept. Im HBEFA 4.2 wurde nun auch der Alterungseffekt berücksichtigt (siehe Kapitel 2.2.3.4). Danach nimmt der Anteil der NO₂-Emissionen an den NO_x-Emissionen mit zunehmendem Fahrzeugalter ab (Tabelle 54). Dies macht sich in einem stärkeren Rückgang der NO₂-Emissionen bemerkbar.

Tabelle 54: TREMOD-Version 6.41 – NO₂-Emissionsfaktoren

In g/km

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	0,133	0,078	0,007	1,009	0,132	0,835	0,226
1991	0,134	0,069	0,009	1,035	0,134	0,827	0,227
1992	0,128	0,063	0,010	1,058	0,136	0,821	0,226
1993	0,120	0,058	0,010	1,046	0,138	0,799	0,231

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1994	0,121	0,055	0,010	1,016	0,133	0,813	0,249
1995	0,118	0,052	0,010	0,962	0,130	0,781	0,244
1996	0,113	0,049	0,010	0,912	0,129	0,740	0,237
1997	0,110	0,046	0,010	0,885	0,129	0,719	0,234
1998	0,107	0,043	0,010	0,886	0,128	0,700	0,230
1999	0,105	0,042	0,010	0,898	0,127	0,686	0,228
2000	0,105	0,042	0,010	0,925	0,125	0,669	0,218
2001	0,114	0,056	0,010	0,955	0,137	0,651	0,233
2002	0,124	0,069	0,010	0,991	0,164	0,624	0,240
2003	0,135	0,082	0,010	1,017	0,194	0,597	0,246
2004	0,149	0,099	0,010	1,108	0,224	0,579	0,257
2005	0,160	0,112	0,010	1,141	0,241	0,562	0,260
2006	0,169	0,123	0,010	1,171	0,250	0,542	0,320
2007	0,177	0,133	0,009	1,174	0,276	0,514	0,319
2008	0,181	0,140	0,009	1,175	0,306	0,479	0,324
2009	0,183	0,145	0,009	1,179	0,332	0,457	0,329
2010	0,187	0,150	0,008	1,147	0,350	0,439	0,327
2011	0,189	0,153	0,008	1,109	0,360	0,423	0,323
2012	0,189	0,155	0,008	1,109	0,356	0,409	0,319
2013	0,189	0,157	0,008	1,062	0,344	0,400	0,315
2014	0,187	0,158	0,008	1,041	0,327	0,374	0,308
2015	0,181	0,156	0,007	0,970	0,305	0,330	0,298
2016	0,172	0,150	0,007	0,887	0,285	0,291	0,283
2017	0,161	0,142	0,007	0,805	0,261	0,260	0,260
2018	0,150	0,134	0,006	0,742	0,238	0,237	0,235
2019	0,136	0,120	0,006	0,687	0,220	0,217	0,213
2020	0,121	0,104	0,006	0,760	0,208	0,199	0,215

Quelle: TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

Tabelle 55 stellt die Unterschiede der Stickstoffdioxidemissionsfaktoren der TREMOD-Version 6.41 gegenüber der Version 6.21 dar. Der Vergleich wird bestimmt von den Unterschieden bei den NO_x-Emissionen, überlagert von den abnehmenden Anteilen der NO₂-Emissionen an NO_x mit dem Fahrzeugalter.

Tabelle 55: Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 – spezifische NO₂-Emissionsfaktoren

Unterschied spezifische NO₂-Emissionen in g/km nach Fahrzeugkategorien und gesamt in Prozent

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	0,2%	0,1%	-2,4%	0,3%	0,4%	0,3%	2,2%
1991	0,2%	0,1%	-2,5%	0,2%	0,4%	0,3%	2,2%
1992	0,2%	0,1%	-2,7%	0,2%	0,4%	0,3%	2,2%
1993	0,1%	0,0%	-2,6%	0,0%	0,0%	0,3%	1,1%
1994	0,1%	0,1%	-2,6%	0,2%	0,4%	0,5%	0,6%
1995	0,1%	0,1%	-2,4%	0,2%	0,8%	0,5%	0,6%
1996	0,1%	0,2%	-2,3%	0,2%	0,8%	0,4%	0,6%
1997	0,1%	0,2%	-2,2%	0,1%	0,8%	0,4%	0,6%
1998	0,1%	0,2%	-2,1%	0,0%	0,8%	0,4%	0,5%
1999	0,1%	0,2%	-2,0%	0,0%	0,7%	0,4%	0,5%
2000	0,1%	0,1%	-2,0%	-0,1%	0,7%	0,4%	0,5%
2001	-0,3%	-0,4%	-2,0%	-0,2%	-3,0%	0,3%	0,0%
2002	-1,1%	-0,9%	-2,0%	-0,3%	-9,6%	0,3%	-0,8%
2003	-2,0%	-1,3%	-2,0%	-0,4%	-15,4%	0,2%	-1,7%
2004	-2,8%	-1,8%	-2,0%	-0,1%	-19,1%	0,2%	-2,1%
2005	-3,8%	-2,3%	-2,0%	-0,6%	-24,6%	0,2%	-2,3%
2006	-5,3%	-3,2%	-1,8%	1,1%	-30,9%	0,0%	-2,4%
2007	-6,5%	-4,2%	-1,6%	0,8%	-32,9%	-0,2%	-3,8%
2008	-8,5%	-6,2%	-1,4%	0,5%	-35,1%	0,3%	-5,3%
2009	-9,2%	-6,9%	-1,2%	0,4%	-34,9%	1,2%	-6,7%
2010	-9,6%	-7,2%	-1,0%	0,4%	-34,8%	1,4%	-8,5%
2011	-10,5%	-8,3%	-0,8%	0,7%	-35,6%	1,9%	-11,1%
2012	-11,7%	-9,5%	-0,4%	1,1%	-37,2%	2,2%	-13,4%
2013	-12,7%	-10,6%	-0,1%	-0,8%	-39,6%	3,9%	-15,7%
2014	-13,9%	-11,8%	0,2%	2,8%	-42,2%	4,4%	-18,1%
2015	-15,8%	-12,7%	0,5%	-2,6%	-45,4%	2,0%	-20,0%
2016	-18,0%	-14,4%	0,4%	-4,5%	-47,6%	-1,8%	-22,0%
2017	-19,3%	-15,3%	0,5%	-2,9%	-48,4%	-6,5%	-23,3%
2018	-19,7%	-15,4%	0,3%	2,5%	-47,9%	-10,8%	-25,7%
2019	-21,5%	-17,6%	0,3%	3,5%	-46,3%	-15,8%	-27,8%

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2020	-22,2%	-17,7%	-0,2%	19,7%	-42,8%	-21,5%	-22,1%

Quelle: TREMOD 6.21 vom 02.09.2021 und TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

Tabelle 56 zeigt die mit TREMOD Version 6.41 berechneten gesamten Stickstoffdioxidemissionen. Die Stickstoffdioxidemissionen nahmen bis 2014 zu und nehmen seitdem langsam ab.

Tabelle 56: TREMOD-Version 6.41 – NO₂-Emissionen des Straßenverkehrs im Inland

In kt

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1990	75	38	0	4,2	1,9	30	1,1
1991	77	34	0	4,2	2,1	35	1,2
1992	76	32	0	4,2	2,3	35	1,3
1993	73	31	0	4,0	2,6	34	1,4
1994	74	29	0	4,0	2,8	37	1,7
1995	74	28	0	3,8	3,0	37	1,7
1996	72	26	0	3,6	3,2	37	1,7
1997	71	25	0	3,5	3,4	37	1,7
1998	70	24	0	3,5	3,6	37	1,7
1999	71	23	0	3,6	3,8	38	1,7
2000	71	24	0	3,7	3,9	38	1,6
2001	79	32	0	3,9	4,6	36	1,8
2002	87	40	0	4,1	5,7	35	1,8
2003	94	47	0	4,2	6,8	34	1,9
2004	105	58	0	4,6	8,0	32	2,0
2005	110	64	0	4,7	8,7	31	2,0
2006	118	72	0	4,9	9,2	31	1,0
2007	125	78	0	4,9	10,4	30	1,0
2008	127	81	0	4,9	11,7	28	0,9
2009	130	86	0	4,9	12,9	25	0,9
2010	134	89	0	4,8	13,7	25	0,9
2011	137	92	0	4,7	14,3	24	0,9
2012	137	94	0	4,7	14,3	23	0,9
2013	138	96	0	4,5	14,0	23	0,9
2014	140	98	0	4,4	14,1	22	0,9

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2015	137	98	0	4,3	13,8	20	0,8
2016	132	95	0	4,0	13,5	18	0,8
2017	125	91	0	3,6	13,0	16	0,7
2018	117	86	0	3,4	12,4	15	0,6
2019	107	77	0	3,1	11,8	14	0,6
2020	83	57	0	2,2	10,6	12	0,5

Quelle: TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

Tabelle 57 zeigt die Differenz der Stickstoffdioxidemissionen der Version 6.41 gegenüber der Version 6.21. Die Emissionen sind nun niedriger und nehmen seit 2000 stärker ab als in der Vorversion.

Tabelle 57: Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 –NO₂-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	0,21%	0,09%	-2,38%	0,32%	0,40%	0,27%	2,16%
1991	0,21%	0,08%	-2,54%	0,24%	0,40%	0,26%	2,19%
1992	0,21%	0,07%	-2,68%	0,18%	0,39%	0,27%	2,23%
1993	0,08%	0,02%	-2,63%	-1,63%	0,01%	0,31%	1,15%
1994	0,03%	0,07%	-2,60%	0,22%	0,41%	-0,06%	0,63%
1995	0,07%	0,13%	-2,43%	0,23%	0,77%	-0,06%	0,63%
1996	0,09%	0,15%	-2,30%	0,16%	0,78%	-0,04%	0,59%
1997	0,10%	0,18%	-2,18%	0,10%	0,77%	-0,02%	0,55%
1998	0,12%	0,19%	-2,11%	0,04%	0,76%	0,01%	0,52%
1999	0,11%	0,18%	-2,02%	-0,03%	0,73%	0,02%	0,49%
2000	0,08%	0,07%	-1,99%	-0,11%	0,72%	0,03%	0,47%
2001	-0,36%	-0,44%	-1,96%	-0,21%	-2,97%	0,03%	0,02%
2002	-1,12%	-0,88%	-1,97%	-0,33%	-9,56%	0,02%	-0,77%
2003	-2,02%	-1,35%	-2,02%	-0,37%	-15,44%	0,02%	-1,70%
2004	-2,78%	-1,82%	-2,04%	-0,05%	-19,11%	0,01%	-2,15%
2005	-3,82%	-2,32%	-1,98%	0,20%	-24,61%	0,04%	-2,30%
2006	-5,29%	-3,21%	-1,78%	1,77%	-30,85%	-0,50%	-2,41%
2007	-6,61%	-4,20%	-1,61%	1,48%	-32,88%	-1,05%	-3,80%
2008	-8,56%	-6,16%	-1,38%	1,12%	-35,06%	-0,84%	-5,26%

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2009	-9,35%	-6,89%	-1,19%	1,05%	-34,86%	-0,39%	-6,71%
2010	-9,72%	-7,15%	-0,97%	1,04%	-34,83%	-0,48%	-8,45%
2011	-10,64%	-8,30%	-0,76%	1,39%	-35,59%	0,17%	-11,08%
2012	-11,77%	-9,49%	-0,42%	1,08%	-37,23%	0,60%	-13,40%
2013	-12,75%	-10,63%	-0,09%	-0,78%	-39,57%	2,44%	-15,68%
2014	-13,90%	-11,78%	0,17%	2,81%	-42,20%	4,39%	-18,13%
2015	-15,80%	-12,72%	0,46%	-2,55%	-45,39%	2,28%	-20,02%
2016	-17,92%	-14,36%	0,43%	-4,48%	-47,63%	-0,25%	-21,98%
2017	-19,11%	-15,26%	0,33%	-2,91%	-48,38%	-3,64%	-23,29%
2018	-19,43%	-15,43%	0,35%	2,53%	-47,93%	-7,16%	-25,73%
2019	-21,45%	-17,58%	0,28%	3,50%	-46,35%	-14,36%	-27,78%
2020	-22,76%	-18,38%	0,40%	-3,26%	-43,57%	-19,96%	-28,95%

Quelle TREMOD 6.21 vom 02.09.2021 und TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

2.7.2.5 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 58 zeigt die Entwicklung der spezifischen Emissionen im betrachteten Zeitraum für alle Fahrzeugkategorien.

Tabelle 58: TREMOD-Version 6.41 – 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	0,778	0,267	0,554	0,350
1995	0,086	0,032	0,084	0,720	0,262	0,513	0,334
1996	0,079	0,031	0,083	0,644	0,245	0,437	0,307
1997	0,074	0,030	0,079	0,590	0,234	0,388	0,289
1998	0,069	0,028	0,077	0,541	0,224	0,346	0,274
1999	0,066	0,028	0,077	0,489	0,211	0,309	0,260
2000	0,063	0,028	0,075	0,447	0,201	0,276	0,248
2001	0,059	0,027	0,071	0,412	0,192	0,252	0,250

Jahr	g/km	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2002	0,056	0,026	0,072	0,369	0,180	0,229	0,236
2003	0,053	0,025	0,070	0,334	0,168	0,213	0,222
2004	0,051	0,025	0,072	0,308	0,160	0,201	0,215
2005	0,049	0,025	0,073	0,283	0,158	0,191	0,211
2006	0,046	0,023	0,073	0,256	0,154	0,177	0,202
2007	0,042	0,021	0,074	0,230	0,140	0,155	0,183
2008	0,036	0,018	0,076	0,197	0,122	0,125	0,160
2009	0,031	0,016	0,080	0,178	0,111	0,107	0,150
2010	0,028	0,015	0,079	0,155	0,101	0,093	0,136
2011	0,025	0,013	0,079	0,139	0,090	0,082	0,123
2012	0,022	0,012	0,078	0,108	0,079	0,072	0,113
2013	0,020	0,010	0,079	0,099	0,067	0,065	0,102
2014	0,018	0,009	0,078	0,088	0,057	0,056	0,093
2015	0,016	0,008	0,078	0,080	0,049	0,047	0,083
2016	0,014	0,007	0,077	0,072	0,041	0,039	0,075
2017	0,012	0,006	0,076	0,063	0,035	0,033	0,066
2018	0,011	0,005	0,076	0,054	0,030	0,028	0,058
2019	0,010	0,005	0,076	0,047	0,026	0,024	0,051
2020	0,009	0,004	0,077	0,040	0,024	0,021	0,045

Quelle: TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

Im Vergleich mit der Version 6.21 gibt es nur geringe Unterschiede. Sie ergeben sich vor allem aus der Aktualisierung der Emissionsfaktoren des HBEFA 4.2. Die größten Änderungen gibt es bei den schweren Nutzfahrzeugen ab dem Jahr 2008 aufgrund der überarbeiteten Emissionsmodellierung und der verbesserten Datenbasis für neue Fahrzeuge (Euro VI) im HBEFA 4.2. Tabelle 59 zeigt die Unterschiede.

Tabelle 59: 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	0,2%	0,1%	n.a.	0,6%	0,5%	0,0%	0,8%
1991	0,1%	0,1%	n.a.	0,5%	0,4%	0,0%	0,9%
1992	0,1%	0,1%	n.a.	0,5%	0,4%	0,0%	0,9%
1993	-0,1%	0,1%	n.a.	0,1%	0,1%	-0,1%	0,1%
1994	-0,2%	0,1%	-0,1%	0,7%	0,4%	-0,1%	0,1%

Jahr	Mittel	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
1995	-0,1%	0,1%	-0,1%	0,8%	0,6%	-0,1%	0,2%
1996	-0,1%	0,1%	-0,1%	0,8%	0,7%	-0,1%	0,3%
1997	0,0%	0,2%	-0,1%	0,8%	0,7%	-0,2%	0,3%
1998	0,0%	0,2%	-0,1%	0,8%	0,6%	-0,3%	0,3%
1999	0,0%	0,2%	-0,1%	0,7%	0,6%	-0,3%	0,3%
2000	0,0%	0,2%	-0,1%	0,7%	0,6%	-0,3%	0,3%
2001	0,0%	0,1%	-0,1%	0,6%	0,5%	-0,3%	0,3%
2002	0,0%	0,1%	-0,1%	0,6%	0,4%	-0,3%	0,2%
2003	0,0%	0,1%	-0,2%	0,6%	0,4%	-0,3%	0,2%
2004	0,0%	0,1%	-0,2%	0,6%	0,4%	-0,3%	0,1%
2005	0,0%	0,1%	-0,1%	0,5%	0,3%	-0,3%	0,1%
2006	-0,1%	0,0%	-0,1%	0,3%	0,4%	-0,2%	0,2%
2007	-0,1%	0,0%	-0,1%	0,4%	0,5%	-0,1%	0,2%
2008	-0,1%	-0,1%	-0,1%	0,4%	0,6%	0,0%	0,2%
2009	-0,2%	-0,2%	-0,1%	0,3%	0,7%	0,1%	0,1%
2010	-0,2%	-0,2%	0,0%	0,4%	0,8%	0,1%	0,1%
2011	-0,2%	-0,3%	0,0%	0,5%	0,8%	0,1%	0,1%
2012	-0,1%	-0,3%	0,0%	3,7%	0,9%	0,1%	0,1%
2013	-0,1%	-0,4%	0,0%	3,9%	1,0%	0,1%	0,0%
2014	0,1%	-0,4%	0,0%	3,4%	1,0%	0,0%	-0,1%
2015	-0,3%	-0,5%	0,0%	-2,5%	1,0%	-1,0%	-0,1%
2016	-0,4%	-0,5%	0,0%	-4,3%	1,0%	-2,1%	-0,1%
2017	-0,5%	-0,5%	-0,2%	-2,9%	0,9%	-3,3%	0,0%
2018	-0,5%	-0,6%	0,0%	0,6%	0,9%	-4,4%	0,0%
2019	-1,1%	-0,6%	0,0%	-0,5%	0,8%	-5,8%	-0,1%
2020	-3,5%	-4,5%	1,4%	-7,4%	0,8%	-9,3%	-0,7%

TREMOMM 6.21 vom 02.09.2021 und TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

Die Abgas-Partikelemissionen gehen über den gesamten Zeitraum entsprechend den Verbesserungen bei den spezifischen Emissionen zurück. Tabelle 60 zeigt die Entwicklung für den betrachteten Zeitraum für die verschiedenen Fahrzeugkategorien.

Tabelle 60: TREMOD-Version 6.41 –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	2,2	6,2	18,5	2,0
1999	44,0	15,5	1,1	2,0	6,3	17,2	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	29,5	12,3	1,2	1,0	5,3	9,2	0,6
2008	25,1	10,6	1,2	0,8	4,7	7,4	0,5
2009	22,1	9,6	1,3	0,7	4,3	5,8	0,4
2010	20,1	8,7	1,2	0,7	4,0	5,2	0,4
2011	18,3	7,9	1,2	0,6	3,6	4,7	0,3
2012	16,2	7,0	1,1	0,5	3,2	4,1	0,3
2013	14,6	6,3	1,1	0,4	2,7	3,7	0,3
2014	13,2	5,7	1,1	0,4	2,5	3,3	0,3
2015	11,8	5,1	1,1	0,4	2,2	2,8	0,2
2016	10,6	4,6	1,1	0,3	2,0	2,4	0,2
2017	9,4	4,0	1,1	0,3	1,7	2,1	0,2
2018	8,4	3,5	1,1	0,2	1,5	1,8	0,2
2019	7,5	3,1	1,1	0,2	1,4	1,6	0,1

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2020	6,2	2,3	1,1	0,1	1,2	1,3	0,1

Quelle: TREMOD 6.41 vom 15.09.2022

Gegenüber der TREMOD-Version 6.21 sind die Abgas-Partikelemissionen vor allem aufgrund der Aktualisierung der Emissionsfaktoren des HBEFA 4.2 unterschiedlich (Tabelle 61). Es ergeben sich daher ähnliche Relationen wie bei den Emissionsfaktoren

Tabelle 61: Vergleich der TREMOD-Version 6.41 gegenüber TREMOD 6.21 –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	0,2%	0,1%		0,6%	0,5%	0,0%	0,8%
1991	0,1%	0,1%		0,5%	0,4%	0,0%	0,9%
1992	0,1%	0,1%		0,5%	0,4%	0,0%	0,9%
1993	-0,1%	0,1%		-1,5%	0,1%	-0,1%	0,1%
1994	-0,2%	0,1%	-0,1%	0,7%	0,4%	-0,7%	0,1%
1995	-0,1%	0,1%	-0,1%	0,8%	0,6%	-0,6%	0,2%
1996	-0,1%	0,1%	-0,1%	0,8%	0,7%	-0,6%	0,3%
1997	-0,1%	0,2%	-0,1%	0,8%	0,7%	-0,6%	0,3%
1998	-0,1%	0,2%	-0,1%	0,8%	0,6%	-0,6%	0,3%
1999	-0,1%	0,2%	-0,1%	0,7%	0,6%	-0,7%	0,3%
2000	-0,1%	0,2%	-0,1%	0,7%	0,6%	-0,7%	0,3%
2001	-0,1%	0,1%	-0,1%	0,6%	0,5%	-0,6%	0,3%
2002	0,0%	0,1%	-0,1%	0,6%	0,4%	-0,6%	0,2%
2003	0,0%	0,1%	-0,2%	0,6%	0,4%	-0,5%	0,2%
2004	0,0%	0,1%	-0,2%	0,6%	0,4%	-0,5%	0,1%
2005	0,0%	0,1%	-0,1%	1,4%	0,3%	-0,5%	0,1%
2006	-0,1%	0,0%	-0,1%	1,0%	0,4%	-0,7%	0,2%
2007	-0,2%	0,0%	-0,1%	1,0%	0,5%	-0,9%	0,2%
2008	-0,2%	-0,1%	-0,1%	1,0%	0,6%	-1,2%	0,2%
2009	-0,3%	-0,2%	-0,1%	1,0%	0,7%	-1,5%	0,1%
2010	-0,4%	-0,2%	0,0%	1,0%	0,8%	-1,8%	0,1%
2011	-0,3%	-0,3%	0,0%	1,1%	0,8%	-1,6%	0,1%
2012	-0,2%	-0,3%	0,0%	3,7%	0,9%	-1,5%	0,1%
2013	-0,2%	-0,4%	0,0%	3,9%	1,0%	-1,3%	0,0%

Jahr	Gesamt	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2014	0,1%	-0,4%	0,0%	3,4%	1,0%	0,0%	-0,1%
2015	-0,3%	-0,5%	0,0%	-2,5%	1,0%	-0,8%	-0,1%
2016	-0,3%	-0,5%	0,0%	-4,3%	1,0%	-0,6%	-0,1%
2017	-0,3%	-0,5%	-0,3%	-2,9%	0,9%	-0,3%	0,0%
2018	-0,2%	-0,6%	0,0%	0,6%	0,9%	-0,4%	0,0%
2019	-1,0%	-0,6%	0,0%	-0,5%	0,8%	-4,3%	-0,1%
2020	-4,2%	-5,3%	2,0%	-25,2%	-0,6%	-7,6%	-9,5%

TREMOMM 6.21 vom 02.09.2021 und TREMOMM 6.41 vom 15.09.2022

3 Aktualisierung des Trendszenarios 2022 bis 2050

3.1 Definition des Trendszenarios

Zur Abschätzung der möglichen zukünftigen Entwicklung des verkehrsbedingten Energieverbrauchs und der Emissionen wird in TREMOD ein Trendszenario bis zum Jahr 2050 definiert. Das Trendszenario soll auf aktuellen Verkehrsleistungsprognosen aufbauen und alle umweltrelevanten politischen Vorgaben, deren Umsetzung beschlossen ist, abbilden. Das Trendszenario wurde zuletzt in der TREMOD-Version 6.16 im Jahr 2020 aktualisiert. Dies entspricht an vielen Stellen nicht mehr dem aktuellen Erkenntnisstand. Es wurde daher in der aktuellen Version vollständig überarbeitet.

Das Szenario berücksichtigt alle Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030. Außerdem sind aktuelle Grenzwertverordnungen der EU berücksichtigt, z. B.:

- ▶ CO₂-Grenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bis 2030 (EU 2019a)
- ▶ CO₂-Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge bis 2030 (EU 2019b)
- ▶ Erneuerbare-Energien-Richtlinie bis 2030 (EU 2018)
- ▶ Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote (Bundesrat 2021)

Die Entwicklung der Verkehrs-, Betriebs- und Fahrleistungen wird aus der aktuellen „Gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose 2022“ des BMDV (BMDV 2023) abgeleitet. Die Prognose deckt mit dem Endjahr 2051 den Zeitraum des Trendszenarios bis 2050 ab. Die Verkehrsleistungsentwicklung kann daher übernommen werden. Lediglich zur Umlegung der Verkehrsleistungen auf die Fahr- und Betriebsleistungen der verschiedenen Fahrzeugkategorien sind weitergehende Annahmen notwendig, die in den jeweiligen Unterkapiteln erläutert werden.

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 Energietypen festzulegen. Alle diese Annahmen wurden in einem gemeinsamen Abstimmungsprozess von UBA und ifeu festgelegt.

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 62: 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

Parameter	Aktuelle Annahmen im TREMOD-Trendszenario
	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.

3.2 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 2022 auf. Somit ist im Zeitraum 2019 bis 2022 die reale Entwicklung bereits weitgehend abgebildet. Für die weitere Entwicklung bis 2036 müssen daher eigene Annahmen getroffen werden:

- ▶ Die Verkehrsleistungen des MIV sind 2036 immer noch niedriger als 2019, jedoch um 9,6% höher als 2022. Es wird von einem linearen Wachstum bis 2036 ausgegangen.
- ▶ Es wird angenommen, dass alle Busverkehre und der Bahnen im Nahverkehr bis 2024 das Niveau von 2019 wieder erreichen. 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 2022 nahezu wieder das Niveau von 2019. Bis 2036 wird ein linearer Anstieg angenommen.
- ▶ Der Güterverkehr auf Straße und Schiene lag 2022 über dem Niveau von 2019. Von 2022 bis 2036 wird ein linearer Anstieg angenommen.
- ▶ Die Binnenschifffahrt lag 2022 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 2022 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 3.6.1).

Die weitere Verkehrsleistungsentwicklung 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 63 dargestellt.

Tabelle 63: Verkehrsleistungsentwicklung 2019-2050

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

	2019	2022	2025	2030	2040	2050	2019-2030	2030-2050
Personenverkehr davon:	1.129	968	1.041	1.096	1.188	1.243	-3,0%	13,4%
Straße	1.012	856	914	948	1.019	1.066	-6,2%	12,3%
MIV	917,4	802,5	819,1	846,8	910,4	948,8	-7,7%	12,0%
BUS	94,1	53,9	95,4	101,7	108,2	116,7	8,1%	14,8%
Fernlinienbus	4,1	2,3	4,2	4,5	4,8	5,1	8,1%	14,8%
Nahlinienbus	38,3	34,8	38,8	41,4	44,0	47,5	8,1%	14,8%
Sonst. Busse	51,6	16,9	52,3	55,8	59,4	64,1	8,1%	14,8%
Schiene	117,7	111,5	127,0	147,2	169,7	177,2	25,1%	20,4%
PNV DB	41,6	34,8	37,3	43,8	51,0	53,0	5,1%	21,2%
PNV NE	14,5	21,4	23,6	27,7	32,3	33,5	91,2%	21,2%
PFV	43,9	41,5	48,3	56,7	66,1	68,7	29,1%	21,2%
SSU-Bahnen	17,7	13,9	17,9	19,1	20,3	21,9	8,1%	14,8%
Güterverkehr davon:	678,7	680,7	715,5	773,9	884,8	981,0	14,0%	26,8%
Straße	498,6	503,1	532,6	581,9	678,6	759,0	16,7%	30,4%
Schiene	129,2	132,6	137,0	144,7	157,2	170,4	12,0%	17,7%
Schiene DB	60,7	59,6	61,6	65,1	70,7	76,6	7,2%	17,7%
Schiene NE	68,5	73,0	75,4	79,7	86,5	93,8	16,3%	17,7%
Binnenschiff	50,9	45,0	45,9	47,3	49,0	51,6	-7,1%	9,1%
Abgehender Flugverkehr								
Personenverkehr davon:	262,7	177,0	266,8	287,1	327,5	367,9	9,3%	28,1%
National	10,6	4,3	10,6	10,3	9,7	8,9	-2,8%	-13,6%
..International	252,1	172,6	256,2	276,8	317,8	359,0	9,8%	29,7%
Güterverkehr davon	12,2	13,2	12,2	11,9	11,3	10,5	-2,2%	-12,2%
..National	0,0	0,0498	0,0493	0,0476	0,0438	0,0398	-4,2%	-16,4%
..International	12,2	13,1	12,1	11,9	11,3	10,4	-2,2%	-12,2%

Quellen: Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2022, eigene Annahmen.

3.3 Straßenverkehr

3.3.1 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 Fahr- und Verkehrsleistungen von 2019 wieder erreicht; danach steigen die Fahrleistungen 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 64 dargestellt.

Tabelle 64: 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	702,5	562,8	14,5	3,3	56,1	63,3	2,4
2025	724,1	574,5	14,8	4,7	61,1	66,5	2,5
2030	758,0	593,9	15,3	5,0	69,5	71,8	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	-3,4%	-7,9%	2,9%	8,1%	29,6%	12,5%	-4,9%
2030-2050	15,4%	12,0%	12,0%	14,8%	35,9%	24,1%	4,5%

Quelle: Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2022, eigene Annahmen.

3.3.2 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.

Das Trendszenario in TREMOD 6.43 bildet im Vergleich zur Version 6.23 eine stärkere Entwicklung der Elektromobilität durch batterieelektrische Fahrzeuge ab. Diese zeichnet sich in den Entwicklungen der jüngsten Daten zu den Neuzulassungen und Ankündigungen der Fahrzeughersteller ab. Politische Instrumente wie die CO₂-Bepreisung im Verkehr, die Weiterentwicklung der THG-Quote und steigende Anforderungen an die Luftqualität unterstützen diesen Trend fahrzeugkategorieübergreifend. Zusätzlich existieren spezielle Förderprogramme und Gesetzgebungen pro Fahrzeugkategorie, die im Folgenden beschrieben werden. Wasserstoff- und Brennstoffzellenfahrzeuge werden im Trendszenario noch nicht berücksichtigt, da die bisherigen Daten keine signifikanten Marktdurchdringungen absehen lassen. Auch im Projektionsbericht 2021 spielt Wasserstoff am Endenergieverbrauch des Verkehrs mit 0,6 PJ von 1649 PJ im Jahr 2030 eine untergeordnete Rolle (Repenning et al. 2021).

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. 2021) und in dieser Version nicht angepasst.

3.3.2.1 Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge

Personenkraftwagen

Die Pkw-Neuzulassungen bis einschließlich 2022 sind durch die KBA-Statistik gegeben und lagen im Jahr 2022 bei 2,65 Millionen Pkw. Fast ein Drittel der Neuzulassungen hatten einen Plug-In- oder batterieelektrischen Antrieb (Tabelle 67).

Für den Zeitraum 2023-2050 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) hergeleitet. Durch das geplante „Verbrennerverbot“ ab 2035 wird sich das Anforderungsniveau der Gesetzgebung deutlich verschärfen (Bundesregierung 2022). Ab dem Jahr 2035 werden im Szenario daher lediglich BEV neu zugelassen. Für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor zum ausschließlichen Betrieb mit synthetischen oder biogenen Kraftstoffen soll eine neue Fahrzeugkategorie eingeführt werden. Dieser Aspekt wird im Szenario allerdings nicht berücksichtigt.

Der Hochlauf von BEV erfolgt durch die Verschärfung deutlich schneller als bisher im Trendszenario angenommen. Die CO₂-Flottengrenzwerte werden in jedem Szenarienjahren eingehalten, siehe Abschnitt 3.3.3.1. Die angenommenen Anteile an den Neuzulassungen sind in der folgenden Tabelle gegeben.

Tabelle 65: 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	41 %	22 %	1 %	13 %	24 %
2024	37 %	20 %	1 %	12 %	31 %
2025	33 %	18 %	<1 %	11 %	38 %
2026	30 %	16 %	<1 %	9 %	44 %
2027	26 %	14 %	<1 %	8 %	51 %

Jahr	Otto (inkl. HEV)	Diesel (inkl. HEV)	CNG & LPG (inkl. HEV)	PHEV	BEV
2028	23 %	12 %	<1 %	7 %	58 %
2029	19 %	10 %	<1 %	6 %	64 %
2030	15 %	8 %	0 %	5 %	71 %
2031	12 %	6 %	0 %	4 %	78 %
2032	8 %	4 %	0 %	3 %	85 %
2033	4 %	2 %	0 %	2 %	91 %
2034	1 %	<1 %	0 %	1 %	98 %
≥2035	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %

Quellen: bis 2022 nach KBA-Statistik; danach Annahmen Trendszenario. 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 2022 gehalten wird (ca. 2 zu 1 Otto/Diesel). Der Anteil von CNG- und LPG-Pkw ist bereits im Jahr 2022 vernachlässigbar klein (ca. 0,7 %) und wird bis 2030 weiter rückläufig angenommen. Ab 2030 werden keine CNG- und LPG-Pkw mehr zugelassen. 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 steigt im Szenario weiterhin leicht an, jedoch mit einer deutlich langsameren Rate als zwischen 1995 und 2021. 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 48 % (ohne PHEV) auf. Der Bestand an BEV und PHEV liegt im Jahr 2025 bei ca. 5,3 Mio. und im Jahr 2030 bei ca. 13,9 Mio. Fahrzeugen. Im alten Szenario wird das Ziel der alten Bundesregierung von 7-10 Mio. Elektrofahrzeugen im Jahr 2030 mit ca. 8,4 Mio. Elektro-Pkw im Bestand eingehalten (BMF 2019). Im aktualisierten Szenario sind im Jahr 2030 ca. 11,3 Mio. vollelektrische Fahrzeuge im Bestand. Somit werden die Pläne der aktuellen Bundesregierung nach dem Koalitionsvertrag in Höhe von 15 Mio. Elektro-Pkw im Jahr 2030 (SPD et al. 2021) verfehlt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 66 dargestellt.

Tabelle 66: Entwicklung der Pkw-Bestände im Trendszenario bis 2050

Jahr	Otto (inkl. HEV)	Diesel (inkl. HEV)	CNG & LPG (inkl. HEV)	PHEV	BEV	Pkw gesamt
2020	31,91 Mio.	15,22 Mio.	0,44 Mio.	0,19 Mio.	0,22 Mio.	48,0 Mio.
2025	29,19 Mio.	12,93 Mio.	0,31 Mio.	1,82 Mio.	3,47 Mio.	47,7 Mio.
2030	24,41 Mio.	9,63 Mio.	0,22 Mio.	2,57 Mio.	11,31 Mio.	48,1 Mio.
2035	17,37 Mio.	5,90 Mio.	0,12 Mio.	2,18 Mio.	23,00 Mio.	48,6 Mio.

Jahr	Otto (inkl. HEV)	Diesel (inkl. HEV)	CNG & LPG (inkl. HEV)	PHEV	BEV	Pkw gesamt
2040	10,47 Mio.	2,99 Mio.	0,06 Mio.	1,33 Mio.	34,19 Mio.	49,0 Mio.
2045	5,36 Mio.	1,32 Mio.	0,03 Mio.	0,67 Mio.	41,95 Mio.	49,3 Mio.
2050	2,30 Mio.	0,52 Mio.	0,01 Mio.	0,29 Mio.	46,44 Mio.	49,6 Mio.

Quelle: eigene Berechnung

Leichte Nutzfahrzeuge

Die absoluten LNF-Neuzulassungen im 2022 lagen laut KBA-Statistik bei 222.474 Fahrzeugen. Für den Zeitraum 2023-2050 werden jährliche Neuzulassungszahlen in Höhe von 200.000-300.000 Fahrzeugen angenommen. Für die Anteile der Antriebsarten an den LNF-Neuzulassungen wurde bisher – wie bei den Pkw – die CO₂-Regulierung der EU herangezogen, um die Neuzulassungsanteile herzuleiten. Durch das geplante „Verbrennerverbot“ ab 2035 wird sich das Anforderungsniveau der Gesetzgebung deutlich verschärfen (Bundesregierung 2022). Im Szenario werden demnach ab dem Jahr 2035 lediglich BEV neu zugelassen. Entgegen der Entwicklung bei den Pkw sind sowohl die Anteile von BEV als auch von Hybridfahrzeugen (inkl. PHEV) bei LNF weiterhin geringer. Damit erfolgt im Szenario ein sehr schneller Hochlauf von BEV. PHEV weisen im Jahr 2022 lediglich einen geringen Anteil von unter einem Prozent auf; zum Vergleich lag der Wert bei Pkw bei 14 %. Demnach werden bei LNF keine nennenswerten Anteile im Szenario angenommen. Die CO₂-Flottengrenzwerte werden in jedem Szenarijahren eingehalten, siehe Abschnitt 3.3.3.1. Die angenommenen Anteile an den Neuzulassungen sind in der folgenden Tabelle gegeben.

Tabelle 67: 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 %	79 %	<1 %	<1 %	13 %
2024	9 %	73 %	<1 %	1 %	18 %
2025	10 %	66 %	<1 %	1 %	23 %
2026	9%	60 %	<1 %	1 %	31 %
2027	8 %	53 %	<1 %	1 %	38 %
2028	7 %	46 %	<1 %	1 %	46 %
2029	6 %	40 %	<1 %	1 %	54 %
2030	5 %	33 %	0 %	<1 %	61 %
2031	4 %	26 %	0 %	<1 %	69 %
2032	3 %	20 %	0 %	<1 %	77 %
2033	2 %	13 %	0 %	<1 %	85 %
2034	1 %	7 %	0 %	<1 %	92 %

Jahr	Otto* (inkl. HEV)	Diesel (inkl. HEV)	CNG (inkl. HEV)	PHEV	BEV
≥2035	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %

Quellen: bis 2022 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 insbesondere der vorherrschenden Diesel-Antriebe. Dem Trend seit 2020 folgend wird ein leichter Anstieg von Otto-Fahrzeugen bis 2025 angenommen, danach sinkt ihr Anteil an den Neuzulassungen wie bei den Diesel-LNF ebenfalls. Der Anteil von CNG-LNF ist bereits im Jahr 2022 vernachlässigbar klein (0,1 %) und wird bis 2030 weiter rückläufig angenommen. Ab 2030 werden keine CNG-LNF mehr zugelassen. Wasserstofffahrzeugen werden analog zu den Pkw-Annahmen weiterhin 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 58 % (ohne PHEV) auf. Der Bestand an BEV und PHEV liegt im Jahr 2025 bei ca. 144.000 und im Jahr 2030 bei ca. 547.000 Fahrzeugen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 66 dargestellt.

Tabelle 68: 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	169.000	2.676.000	10.000	4.000	139.000	2.999.000
2030	187.000	2.276.000	6.000	10.000	536.000	3.016.000
2035	152.000	1.607.000	3.000	10.000	1.264.000	3.036.000
2040	95.000	942.000	2.000	7.000	2.042.000	3.088.000
2045	53.000	499.000	1.000	4.000	2.575.000	3.132.000
2050	27.000	244.000	<1.000	2.000	2.891.000	3.165.000

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

3.3.2.2 Schwere Nutzfahrzeuge und Busse

Im Jahr 2022 wurden laut KBA Neuzulassungen 31.420 Lkw mit einem Gesamtgewicht >3,5 t, 32.608 Sattelzugmaschinen und 4.883 Busse zugelassen. Für die Folgejahre werden die Annahmen aus TREMOD 6.21 beibehalten. Die Neuzulassungen dieser Fahrzeuge steigen somit weiter an und liegen im Jahr 2050 für Lkw >3,5 t bei 42.251, Sattelzüge bei 39.686 und Busse bei 5.478 Fahrzeugen pro Jahr.

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 2022 etwa 5 % 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 69).

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).

Parallel hat sich auch das Fahrzeugangebot stark ausgeweitet, wie aus Marktbeobachtungen des ifeu im Rahmen des Projekts my-e-roads hervorgeht (Jöhrens 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 angekündigt⁵.

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. In dieser Bandbreite liegen auch die Annahmen des Projektionsberichts 2021, welcher für das Jahr 2030 einen Neuzulassungsanteil von 15% Nullemissionsfahrzeugen (BEV und Oberleitungs-Lkw) annimmt (Repenning et al. 2021). Verschiedene Hersteller, z.B. Daimler, Scania, MAN, IVECO haben demgegenüber teils deutliche ambitioniertere 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 einen Neuzulassungsanteil von ZEVs von 74% (davon 57% BEV, 17% FCEV). Allerdings basieren diese Prognosen auf Ankündigungen, deren Umsetzung auf freiwilliger Basis erfolgt.

Das TREMOD-Trendszenario nimmt daher einen Anteil von 21% Elektrofahrzeugen bei SNF insgesamt im Jahr 2030 an und orientiert sich daher innerhalb der angegebenen Bandbreite, welche zur Erfüllung der CO₂-Gesetzgebung erforderlich ist. Wie bei den bisherigen Zulassungen ist der BEV-Anteil auch zukünftig bei Lkw ≤12 t deutlich höher als bei Lkw >12 t und Sattelzügen. Nach 2030 nehmen die Elektroanteile in allen Größenklassen deutlich zu, so dass bei den Lkw ≤12 t bereits ab 2040 nur noch elektrische und bei den Sattelzügen im Jahr 2050 über 90%

⁵ Brennstoffzellenfahrzeuge werden im Trendszenario nicht berücksichtigt

Elektrofahrzeuge zugelassen werden (siehe Tabelle 69), auch wenn dies allein aus den CO₂-Vorgaben der Flottenzielwerte noch nicht vorgeschrieben ist. Für Erdgas-Lkw wird keine Steigerung angenommen. Diese stiegen zwar in den letzten Jahren aufgrund verschiedener Förderprogramme an, spielen jedoch in den Ankündigungen der Hersteller, ihrem Beitrag zur Erfüllung der CO₂-Gesetzgebung, eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 69: Anteil der Neuzulassungen der SNF im Trendszenario nach Antriebsart

Baujahr	Diesel	CNG/LNG	BEV
Lkw ≤ 12 t			
2022	95%	<1%	4,6%
2025	78%	<1%	21%
2030	45%	<1%	55%
2040	0%	0%	100%
2050	0%	0%	100%
Lkw > 12 t			
2022	97%	2,5%	0,7%
2025	90%	2,5%	7,6%
2030	79%	2,5%	19%
2040	14%	2,5%	84%
2050	0%	0%	100%
Sattelzüge			
2022	97%	3,0%	<1%
2025	93%	3,0%	3,9%
2030	87%	3,0%	10%
2040	46%	3,0%	51%
2050	6,0%	3,0%	91%

Quellen: 2022 KBA-Daten, danach eigenen Annahmen.

Auch bei den Bussen, insbesondere den Nahlinienbussen, zeigt sich 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 11% Elektrofahrzeugen im Jahr 2021 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). Verschiedene Städte, darunter auch die großen Metropolen Hamburg, Berlin, München, Köln haben bereits vor Jahren Ziele zum Umstieg auf Nullemissionsfahrzeuge für ihre Busflotten formuliert (Hielscher (WiWo) 2018). Laut dem „E-Bus Radar“ dürfte der E-Busbestand alleine aufgrund der aktuellen Bestellungen der Verkehrsunternehmen bis zum Jahr 2030 von den heute 1151 Elektrobussen

(davon 91 Wasserstoffbusse) um weitere 5511 Elektrobusse steigen und somit über 10% des Linienbusbestandes ausmachen (PwC 2022).

Für TREMOD wird angenommen, dass die BEV-Neuzulassungsanteile für alle Linienbusse im Jahr 2022 bei ca. 15% liegen und in den Folgejahren weiter steigen. Inwiefern die Mindestanforderungen der CVD von 22,5% ab August 2021 erfüllt werden, ließ sich nicht überprüfen⁶. Bis 2030 steigt der NZL-Anteil auf 64%, ab 2040 werden fast nur noch Elektrobusse zugelassen. Entsprechend geht der Anteil von 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 sehr geringen Anteil der alternativen Antriebe aus.

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

Tabelle 70: Anteil der Neuzulassungen der Linien- und Reisebusse im Trendszenario nach Antriebsart

Baujahr	Diesel	Diesel HEV	CNG	BEV
Nahlinienbusse				
2022	59%	24%	<1%	16%
2025	40%	33%	<1%	26%
2030	3%	33%	<1%	64%
2040	0%	3%	0%	97%
2050	0%	0%	0%	100%
Fernlinien- und Reisebusse				
2022	100%	0%	0%	<1%
2025	99%	0%	0%	1%
2030	89%	0%	0%	11%
2040	54%	0%	0%	46%
2050	13%	0%	0%	87%

3.3.2.3 Motorisierte Zweiräder und sonstige Fahrzeugkategorien

Im Jahr 2022 wurden laut KBA 222.474 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 ca. 26.000 Mopeds 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.

⁶ Da laut E-Bus-Radar nur ca. 35.000 der über 54.000 ÖPNV-Bussen unter die CVD fallen, könnten die Neuzulassungsanteile von Elektrobusen an diesen Bussen auch höher sein als an der Gesamtflotte, welche TREMOD abbildet.

Die Neuzulassungen von Krafträdern und Kleinkrafträdern umfassen neben Benzin zunehmend batterieelektrische Fahrzeuge. Bei den Krafträdern waren im Jahr 2022 bereits 15% der Neuzulassungen batterieelektrisch und verzeichneten damit einen starken Anstieg gegenüber dem Jahr 2021 mit 2%. 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 Jan-Sep im Jahr 2022 insgesamt bei 33 % lag und damit von 15% im Jahr 2019 seither stark gestiegen ist (ACEM 2022). Im TREMOD-Trendszenario wird 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 71).

Tabelle 71: Anteil der Neuzulassungen motorisierter Zweiräder im Trendszenario nach Antriebsart

Baujahr	Krafträder		Kleinkrafträder	
	Otto	BEV	Otto	BEV
2022	85%	15%	70%	30%
2025	71%	29%	43%	57%
2030	50%	50%	0%	100%
2040	0%	100%	0%	100%
2050	0%	100%	0%	100%

Quelle: Bis 2022 für Krafträder KBA, für sonstige Werte eigene Annahmen

Bei den übrigen Kfz wurden im Jahr 2022 8776 Fahrzeuge ≤ 12 t (UeKfz) mit einem BEV-Anteil von 16% und 12.040 Fahrzeuge mit $>3,5$ t (UeKfzs) zugelassen und einem BEV-Anteil von 0,7% zugelassen. Bei den restlichen Fahrzeugen handelt es sich Dieselfahrzeuge. Die Entwicklung im Trendszenario lehnt sich für UeKfz an LNF und bei den UeKfzs an die Lkw an.

3.3.3 Entwicklung der Energieeffizienz

3.3.3.1 Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge

Personenkraftwagen

Gemäß den Daten des CO₂-Monitoring (im NEFZ) sind die durchschnittlichen CO₂-Emissionen von Neufahrzeugen in Deutschland seit 1990 bis zum Jahr 2022 gesunken. Seit 2015 stagniert jedoch der NEFZ-Wert bei Otto-Pkw und Diesel-Pkw (KBA 2023a). Dies ist in erster Linie auf den gestiegenen Anteil leistungsstarker Fahrzeuge (insb. SUV) zurückzuführen. Durch den hohen Anteil an HEV, PHEV und BEV konnten trotz der zuletzt ausgebliebenen Effizienzverbesserungen (im Testzyklus) bei den Otto- und Diesel-Pkw die Flottengrenzwerte der Pkw eingehalten werden.

Im Trendszenario wird angenommen, dass Otto- und Diesel-Pkw (ohne HEV) keine Effizienzgewinne (Verbrauch pro km) aufweisen. Jedoch 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 NEFZ als auch im Realbetrieb von HEV wird ein Verbrauchsvorteil von 20 % ggü. Verbrenner-Fahrzeugen ohne Hybridantrieb angenommen. Dieser Vorteil deckt sich mit den Angaben aus (KBA 2023a) für NEFZ und (Spritmonitor 2023) für Realverbrauch.

Die folgende Tabelle fasst die CO₂-Emissionen nach NEFZ und 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 3.3.2.1.

Tabelle 72: CO₂-Emissionen nach NEFZ 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	128 g/km	115 g/km	23%	125 g/km	143 g/km	136 g/km	21%	141 g/km
2022	130 g/km	116 g/km	27%	127 g/km	139 g/km	136 g/km	24%	138 g/km
2025	130 g/km	104 g/km	38%	120 g/km	139 g/km	111 g/km	34%	129 g/km
2030	130 g/km	104 g/km	57%	115 g/km	139 g/km	111 g/km	49%	125 g/km
2035	130 g/km	104 g/km	76%	110 g/km	139 g/km	111 g/km	64%	121 g/km

Quellen: bis 2022 Sonderauswertung KBA, nach 2022 eigene Ermittlung.

Die folgende Tabelle fasst die Annahmen für die CO₂-Emissionen nach NEFZ für PHEV, LPG- und CNG-Pkw zusammen.

Tabelle 73: CO₂-Emissionen nach NEFZ für PHEV, LPG- und CNG-Pkw 2015-2035

Jahr	PHEV Otto	PHEV Diesel	LPG	CNG
2015	44 g/km	52 g/km	129 g/km	179 g/km
2020	42 g/km	41 g/km	114 g/km	99 g/km
2021	39 g/km	41 g/km	112 g/km	93 g/km
2022	34 g/km	37 g/km	107 g/km	94 g/km
≥2023	69 g/km	74 g/km	107 g/km	94 g/km

Quellen: bis 2022 Sonderauswertung KBA, nach 2022 eigene Ermittlung.

Anmerkung: Bei PHEV ändern sich künftig die Prüfbedingungen im WLTP siehe (Plötz und Link 2022) . Es ist demnach schwer abzuschätzen wie sich der WLTP und insb. die hier vereinfachend verwendete NEFZ entwickeln wird. Es wird angenommen, dass der NEFZ von PHEV Otto und Diesel zwischen den Werten der jeweiligen HEV und den Werten von PHEV im Jahr 2022 liegen wird. Da die NEFZ von PHEV für die Realverbräuche im Szenario nicht verwendet werden, sind die Angaben bzw. Annahmen nur informativ.

Werden nun die Neuzulassungsanteile pro Fahrzeugtechnologie herangezogen und mit den CO₂-Emissionen nach NEFZ gewichtet, erhält man die CO₂-Flottenemissionen. Zwar wird die europäischen CO₂-Grenzwertgesetzgebung mittlerweile nach dem WLTP statt dem NEFZ umgesetzt, aber vereinfachend wird hier der NEFZ verwendet, um relative Änderungen übersichtlich darstellen zu können. Es soll überprüft werden, ob die relativen Änderungen für 2025 und 2030 durch die angenommenen Technologieanteile und Effizienzverbesserungen eingehalten werden. Die folgende Tabelle stellt die CO₂-Flottenemissionen der in Deutschland zugelassenen Pkw nach NEFZ im Szenario dar.

Tabelle 74: CO₂-Emissionen nach NEFZ und Grenzwert in NEFZ 2025 und 2030

Jahr	Flotte	Grenzwert
2020	117 g/km	95 g/km
2025	71g/km	81 g/km
2030	31 g/km	43 g/km

Quellen: bis 2020 Sonderauswertung KBA, nach 2020 eigene Ermittlung. Grenzwert wird seit 2021 im WLTP definiert. Hier wird vereinfachend der NEFZ-Grenzwert dargestellt.

Zwar sind die Flottenwerte im Jahr 2020 höher als der Grenzwert, aber durch die Aspekte Anpassung des Grenzwerts durch Fahrzeuggewicht, Supercredits und Nichtberücksichtigung von 5% der Flotte, konnte der Grenzwert dennoch eingehalten werden. Es ist ersichtlich, dass durch die Annahmen die Flottengrenzwerte im Szenario deutlich eingehalten werden.

Um die Realemissionen aus den NEFZ-Werten abzuleiten, werden Zuschlagsfaktoren auf die Werte multipliziert. Diese wurden im Projekt (Althaus et al. 2020) abgeleitet. Für Pkw mit Otto-Motor wird ein Zuschlag von 38 % und für Diesel-Motoren von 44 % verwendet. Dieser bleibt im Szenario konstant. Die realen spezifischen CO₂-Emissionen von LPG- und CNG-Pkw Jahr 2022 werden aus den NEFZ-Verbräuchen abgeleitet und im Szenario konstant belassen.

Bei PHEV wird ein anderer Ansatz zur Ermittlung der Realemissionen verwendet. Für den verbrennungsmotorischen Betriebsmodus werden die hergeleiteten Emissionen im Jahr 2022 von den jeweiligen HEV-Pkw (Otto bzw. Diesel) verwendet. Für den Strommodus werden die Stromverbräuche aus dem HBEFA übernommen. Bei Diesel-PHEV liegen diese rund 12 % über den angenommenen Verbräuchen der BEV und bei Otto-PHEV rund 12 % unterhalb. Die Verbräuche in beiden Modi werden aufbauend auf dem Jahr 2022 konstant belassen. Nichtsdestoweniger gibt es Verbesserungen bei den direkten Emissionen durch einen steigenden Anteil der elektrischen Fahrleistung der PHEV. Diese sind in der folgenden Tabelle gegeben.

Tabelle 75: Elektrische Fahranteile von Pkw-PHEV

Jahr	Autobahn	außerorts	innerorts
≤2020	11%	36%	43%
2021	12%	40%	48%
2022	14%	44%	53%
2023	15%	48%	57%
2024	16%	52%	62%
≥2025	17%	56%	67%

Quellen: HBEFA 4.2 (Notter et al. 2022). Anmerkung: Vereinfachend werden die Anteile auf alle PHEV, also auch auf Fahrzeuge älteren Baujahrs angewendet.

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. Verbräuche 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 76: 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	175 g/km	201 g/km	157 g/km	115 g/km	163 g/km & 201 Wh/km	204 g/km & 254 Wh/km	208 Wh/km
2021	172 g/km	204 g/km	154 g/km	108 g/km	163 g/km & 202 Wh/km	208 g/km & 256 Wh/km	228 Wh/km
2022	175 g/km	199 g/km	147 g/km	115 g/km	162 g/km & 202 Wh/km	197 g/km & 256 Wh/km	228 Wh/km
2025	175 g/km	186 g/km	147 g/km	115 g/km	162 g/km & 202 Wh/km	197 g/km & 256 Wh/km	228 Wh/km
2030	159 g/km	181 g/km	147 g/km	115 g/km	162 g/km & 202 Wh/km	197 g/km & 256 Wh/km	228 Wh/km
2035	152 g/km	174 g/km	147 g/km	115 g/km	162 g/km & 202 Wh/km	197 g/km & 256 Wh/km	228 Wh/km

Anmerkungen: bis 2022 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. Die angenommenen Anteile sind in Tabelle 75 gegeben. ³wie HBEFA 4.2.

Leichte Nutzfahrzeuge

Gemäß den Daten des CO₂-Monitoring (im NEFZ) sind die durchschnittlichen CO₂-Emissionen in Deutschland seit 2013 bis zum Jahr 2022 gesunken (KBA 2023a). 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 20 % ggü. konventionellen Verbrennern auf. Die folgende Tabelle fasst die CO₂-Emissionen nach NEFZ und 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 3.3.2.1.

Tabelle 77: CO₂-Emissionen nach NEFZ 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	<1%	189 g/km	188 g/km	108 g/km	<1%	188 g/km
2020	174 g/km	-*	<1%	175 g/km	177 g/km	161 g/km	<1%	177 g/km
2021	163 g/km	-*	<1%	164 g/km	171 g/km	159 g/km	<1%	171 g/km
2022	162 g/km	-*	2%	163 g/km	166 g/km	154 g/km	<1%	166 g/km
2025	160 g/km	128 g/km	5%	160 g/km	166 g/km	133 g/km	2%	165 g/km
2030	160 g/km	128 g/km	34%	151 g/km	166 g/km	133 g/km	28%	156 g/km
2035	160 g/km	128 g/km	53%	145 g/km	166 g/km	133 g/km	43%	151 g/km

Quellen: bis 2022 Sonderauswertung KBA, nach 2022 eigene Ermittlung. Anmerkungen: *Keine verwendbaren Werte gegeben.

Für CNG-Fahrzeuge und Otto-PHEV werden keine Verbesserung ab dem Jahr 2021 angenommen. LPG- und Diesel-PHEV-LNF sind im Szenario nicht definiert. Allgemein sind die Anteile der drei genannten Segmente vernachlässigbar klein, siehe Abschnitt 3.3.2.1.

Tabelle 78: CO₂-Emissionen nach NEFZ für PHEV-LNF und CNG-LNF 2015-2035

Jahr	PHEV Otto	CNG
2015	-	146 g/km
2020	58 g/km	134 g/km
2021	57 g/km	128 g/km
2022	57 g/km	128 g/km
≥2023	93 g/km*	128 g/km

Quellen: bis 2022 Sonderauswertung KBA, nach 2022 eigene Ermittlung. Anmerkung: *Bei PHEV ändern sich künftig die Prüfbedingungen im WLTP siehe (Plötz und Link 2022). Es ist demnach schwer abzuschätzen wie sich der WLTP und insb. die hier vereinfachend verwendete NEFZ entwickeln wird. Es wird angenommen, dass der NEFZ von PHEV Otto zwischen dem Wert von HEV Otto und dem Wert von PHEV Otto des Jahres 2022 liegt. Da die NEFZ von PHEV für die Realverbräuche im Szenario nicht verwendet werden, sind die Angaben bzw. Annahmen nur informativ.

Mit den angenommenen Flottenanteilen und Verbesserungsdaten werden die CO₂-Flottengrenzwerte bei den LNF voraussichtlich im gesamten Szenario eingehalten. Die folgende Tabelle stellt die CO₂-Flottenemissionen der in Deutschland zugelassenen LNF nach NEFZ im Szenario dar.

Tabelle 79: CO₂-Emissionen nach NEFZ und Grenzwert in NEFZ 2025 und 2030

Jahr	Flotte	Grenzwert*
2020	170 g/km	147 g/km
2025	126 g/km	125 g/km
2030	60 g/km	101 g/km

Quellen: bis 2020 Sonderauswertung KBA, nach 2020 eigene Ermittlung. Grenzwert wird seit 2021 im WLTP definiert. Hier wird vereinfachend der NEFZ-Grenzwert dargestellt. Anmerkung: *beim Grenzwert wird noch eine Gewichtskorrektur (ca. Im Bereich von 10-20 g/km) vorgenommen, die den realen Grenzwert nach oben setzt. Zudem ermöglichte die zusätzliche Anrechnung von BEV und z. T. PHEV (Supercredits) bis zum Jahr 2022 die Reduktion der CO₂-Werte der Flotte.

Um die Realemissionen aus den NEFZ-Werten abzuleiten, werden Zuschlagsfaktoren auf die Werte multipliziert. Diese wurden im Projekt (Althaus et al. 2020) abgeleitet. Für Otto-Fahrzeuge wird ein Zuschlag von 29 % und für Diesel von 47 % für das Szenario angenommen. Für CNG-LNF werden die Faktoren von Otto-LNF übernommen. Bei Otto-PHEV wird für die Ermittlung der Realemissionen die Emissionen von Otto-LNF (ohne HEV) für den Verbrennermodus verwendet. Für den Strommodus wird der Verbrauch von BEV übernommen. Der elektrische Fahranteil liegt bei knapp über 50% über die gesamte Zeitreihe.

Der Verbrauch von BEV wird ab dem Jahr 2022 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 80: Reale CO₂-Emissionen und Stromverbrauch bei LNF-Neuzulassungen im Szenario

Jahr	Otto ¹	Diesel ¹	CNG	Otto-PHEV ²	BEV
2020	233 g/km	258 g/km	116 g/km	226 g/km & 394 Wh/km	410 Wh/km
2021	208 g/km	251 g/km	141 g/km	215 g/km & 351 Wh/km	413 Wh/km
2022	213 g/km	244 g/km	204 g/km	213 g/km & 427 Wh/km	427 Wh/km
2025	207 g/km	243 g/km	204 g/km	213 g/km & 427 Wh/km	427 Wh/km
2030	195 g/km	231 g/km	204 g/km	213 g/km & 427 Wh/km	427 Wh/km
2035	187 g/km	223 g/km	204 g/km	213 g/km & 427 Wh/km	427 Wh/km

Anmerkungen: bis 2022 real, ab 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.

3.3.3.2 Schwere Nutzfahrzeuge und Busse, motorisierte Zweiräder

Mit der am 20. Juni 2019 veröffentlichten Verordnung (EU) 2019/1242 liegt 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 2023). 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 81: 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 Verbesserungsraten. 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.

Tabelle 82: 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.

Baujahr	SNF Diesel & Erdgas
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.

Tabelle 83: 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

3.3.3.3 Motorisierte Zweiräder und sonstige Fahrzeugkategorien

Für die motorisierten Zweiräder wird keine Effizienzverbesserung angenommen.

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

3.3.4 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 2022 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 2022). Dieser Vorschlag sieht 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 von TREMOD 6.43 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 6.43 noch nicht berücksichtigt. Dies sollte in zukünftigen Aktualisierungen und nach Möglichkeit aufbauend auf einer Aktualisierung des HBEFA umgesetzt werden.

3.4 Schienenverkehr

3.4.1 Betriebsleistung und Auslastung

Die Auslastungsgrade des Personenverkehrs der DB AG nahm bis 2019 zu. Nach dem pandemiebedingten Einbruch im Jahr 2020 stieg die Auslastung im Jahr 2022 wieder deutlich an, blieb

aber 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 84: Entwicklung der Auslastungsgrade im Güter-, Personenfern- und Personennahverkehr

Zuggattung	2019	2022	2025	2030	2040	2050	2019-2030	2030-2050
GV	57,3%	59,3%	58,5%	57,3%	55%	53%	-0,1%	-7,4%
PFV	56,3%	46,0%	51,0%	56,0%	58%	58%	-0,5%	+3,6%
PNV	28,1%	24,2%	26,0%	28,0%	29%	29%	-0,5%	+3,6%

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 2024 Neufahrzeuge mit fast ausschließlich batterie-elektrischem Antrieb (BEMU) gefordert. Andere Antriebsformen wie Brennstoffzellen (HEMU) werden bereits eingesetzt.⁷

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. Gegenüber den Vorversionen wird aufgrund der aktuell erkennbaren Aktivitäten zum Ersatz des Dieselantriebs von einem deutlich stärkeren Rückgang der Dieseltraktion bis 2050 ausgegangen.

Die angenommenen Anteile der Dieseltraktion an den Betriebsleistungen sind in Tabelle 85 zusammengefasst.

Tabelle 85: Entwicklung des Dieselanteils an den Betriebsleistungen im Güter-, Personenfern- und Personennahverkehr

Bereich	2019	2022	2025	2030	2040	2050	2019-2030	2030-2050
GV DB	4,0%	6,3%	5%	4%	2%	0,5%	0%	-88%
PFV DB	1,6%	1,4%	1,1%	1,0%	0,8%	0,6%	-38%	-40%
PNV DB	13,0%	15,8%	10%	8%	5%	3%	-38%	-63%
GV NE	6,2%	6,0%	5,6%	5,1%	4,0%	3,1%	-18%	-39%

⁷ <https://www.dw.com/de/der-erste-ohne-emissionen-brennstoffzellen-zug-startet/a-45516725>

Bereich	2019	2022	2025	2030	2040	2050	2019-2030	2030-2050
PNV NE	34%	30%	22%	10%	7%	4%	-71%	-60%

Quelle: DB AG, eigene Annahmen

3.4.2 Entwicklung der Energieeffizienz

Durch die Einführung neuer Fahrzeuge (z. B.: ICE 3, ICE 4, moderne Triebwagen im Personenverkehr) 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 bei der Elektrotraktion um 1 % pro Jahr bis 2030 ab 2020, 0,5 % bei der Dieseltraktion.
- ▶ Im Güterverkehr: Minderung des spezifischen Energieverbrauchs je Tonnenkilometer von 2021 bis 2030 bei der Elektrotraktion um 1 % pro Jahr, bei der Dieseltraktion um 0,5 % pro Jahr. Dies wird modelliert durch Absenkung des spezifischen Energieverbrauchs je angebotenen Tonnenkilometer bei unveränderter Auslastung.
- ▶ Von 2030 bis 2050 wird bei allen Traktionsarten eine weitere Minderung um 0,5 % pro Jahr angenommen.

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

3.4.3 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 86: Emissionsgrenzwerte Schienenverkehr (g/kWh)

Stufe	Gültig ab*	Leist.-kl. (kW)	CO	HC	NO _x	PM
Triebwagen						

Stufe	Gültig ab*	Leist.-kl. (kW)	CO	HC	NO _x	PM
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.

3.5 Binnenschifffahrt

Die Annahmen für die Binnenschifffahrt im Trendszenario werden mit Ausnahme der Fahr- und Verkehrsleistungsentwicklung aus TREMOD 6.23 beibehalten. Der Vollständigkeit halber werden alle Annahmen im Folgenden aufgeführt.

3.5.1 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 wurde abweichend davon aufgrund der niedrigen Wasserstände in den Sommermonaten eine Reduktion der Auslastung angenommen, weshalb die mittlere Beladung pro Schiff mit 926 t niedriger als in den Vorjahren liegt. Ab 2023 beträgt die mittlere Beladung knapp unter 1.200 t und steigt bis zum Jahr 2030 auf 1.270 t an.

3.5.2 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 Förder-

programm 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.

3.5.3 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 87).

Tabelle 87: 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

3.6 Flugverkehr

3.6.1 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 2022 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 angenommen, dass dieselben Verkehrsmengen wie im Jahr 2019 vorliegen. Das Zwischenjahr 2023 wird linear interpoliert.

Nach 2024 wird angenommen, dass die Anzahl Starts der nationalen Flüge um ca. 16.000 Starts pro Jahr 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 um ca. 1.600 Starts pro Jahr. 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 88: Anzahl Starts

Jahr	National	International
2019	1,73 Mio.	0,90 Mio.
2020	1,46 Mio.	0,40 Mio.
2021	1,52 Mio.	0,50 Mio.
2022	1,57 Mio.	0,72 Mio.
2023	1,65 Mio.	0,81 Mio.
2024	1,73 Mio.	0,90 Mio.
2030	1,62 Mio.	0,91 Mio.
2040	1,47 Mio.	0,92 Mio.
2050	1,32 Mio.	0,94 Mio.

Quellen: bis 2021 nach TREMOD, HVF 2022 nach Destatis, sonstiger Flugverkehr 2022 gleich 2021 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 89: Änderungen des Aufkommens und der mittleren Flugweite pro Flug ggü. 2019

Jahr	National			International		
	Flugweite	Fracht	Passagiere	Flugweite	Fracht	Passagiere
2019	-	-	-	-	-	-
2020	-9 %	+24 %	-62%	+3 %	+98 %	-45 %
2021	-47 %	+119 %	-54%	-6 %	+110 %	-41 %

Jahr	National			International		
2022	-43 %	+93 %	-22%	-4 %	+40 %	-11 %
2023	-20 %	+32 %	-7%	-2 %	+17 %	-5 %
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 2021 nach TREMOD, HVF 2022 nach Destatis, sonstiger Flugverkehr 2022 gleich 2021 gesetzt; danach Annahmen Trendszenario.

Zu erkennen ist, dass die durchschnittliche Flugweite beim nationalen Flugverkehr in den Jahren 2021 und 2022 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. 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. 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 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 90: 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.	49,7 Mio.	424 Mio.	252,1 Mrd.	12,2 Mrd.	1.667 Mio.
2020	3,1 Mrd.	47,2 Mio.	326 Mio.	63,9 Mrd.	11,0 Mrd.	763 Mio.
2021	2,3 Mrd.	51,2 Mio.	200 Mio.	76,9 Mrd.	13,3 Mrd.	867 Mio.
2022	4,3 Mrd.	50,0 Mio.	221 Mio.	172,6 Mrd.	13,1 Mrd.	1.285 Mio.
2023	7,5 Mrd.	49,8 Mio.	322 Mio.	212,4 Mrd.	12,6 Mrd.	1.476 Mio.

Jahr	National			International		
2024	10,6 Mrd.	49,7 Mio.	424 Mio.	252,1 Mrd.	12,2 Mrd.	1.667 Mio.
2030	10,3 Mrd.	47,6 Mio.	399 Mio.	276,8 Mrd.	11,9 Mrd.	1.699 Mio.
2040	9,7 Mrd.	43,8 Mio.	364 Mio.	317,8 Mrd.	11,3 Mrd.	1.745 Mio.
2050	8,9 Mrd.	39,8 Mio.	328 Mio.	359,0 Mrd.	10,4 Mrd.	1.794 Mio.

Quellen: bis 2021 nach TREMOD, HVF 2022 nach Destatis, sonstiger Flugverkehr 2022 gleich 2021 gesetzt; danach Annahmen Trendszenario.

3.6.2 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.

3.6.3 Entwicklungen der Gesamtemissionen

In Tabelle 91 sind die Emissionen von CO₂ sowie der Schadstoffe NO_x und PM₁₀ angegeben. Beim nationalen Flugverkehr führen die Reduktion der Verkehrsleistung und die Effizienzgewinne zu einer deutlichen Reduktion der Emissionen gegenüber 2024. So nehmen die CO₂-Emissionen um 34 % bis 2050 ab. Beim internationalen Flugverkehr steht der Anstieg der Effizienz der Erhöhung der Verkehrsleistung gegenüber. Es kommt zu einem leichten Anstieg von knapp 2 % bis 2050. Insgesamt stagnieren die gesamten CO₂-Emissionen des Flugverkehrs auf dem Niveau von 2024.

Tabelle 91: Emissionen des Flugverkehrs im Szenario

Jahr	National			International		
	CO ₂	NO _x	PM ₁₀	CO ₂	NO _x	PM ₁₀
2019	2,20 Mio. t	10,81 kt	0,13 kt	28,00 Mio. t	142,81 kt	1,34 kt
2020	1,06 Mio. t	4,75 kt	0,08 kt	12,73 Mio. t	65,73 kt	0,61 kt
2021	0,79 Mio. t	3,44 kt	0,05 kt	14,19 Mio. t	73,08 kt	0,69 kt
2022	1,09 Mio. t	5,04 kt	0,06 kt	20,60 Mio. t	105,96 kt	1,01 kt
2023	1,64 Mio. t	7,93 kt	0,09 kt	24,28 Mio. t	124,38 kt	1,15 kt
2024	2,20 Mio. t	10,81 kt	0,13 kt	27,97 Mio. t	142,81 kt	1,34 kt
2030	2,01 Mio. t	9,29 kt	0,11 kt	28,16 Mio. t	135,24 kt	1,34 kt
2040	1,72 Mio. t	7,19 kt	0,10 kt	28,29 Mio. t	122,54 kt	1,33 kt
2050	1,45 Mio. t	5,49 kt	0,08 kt	28,44 Mio. t	111,11 kt	1,33 kt

Quellen: bis 2021 nach TREMOD; danach Annahmen Trendszenario.

3.7 Ergebnisse

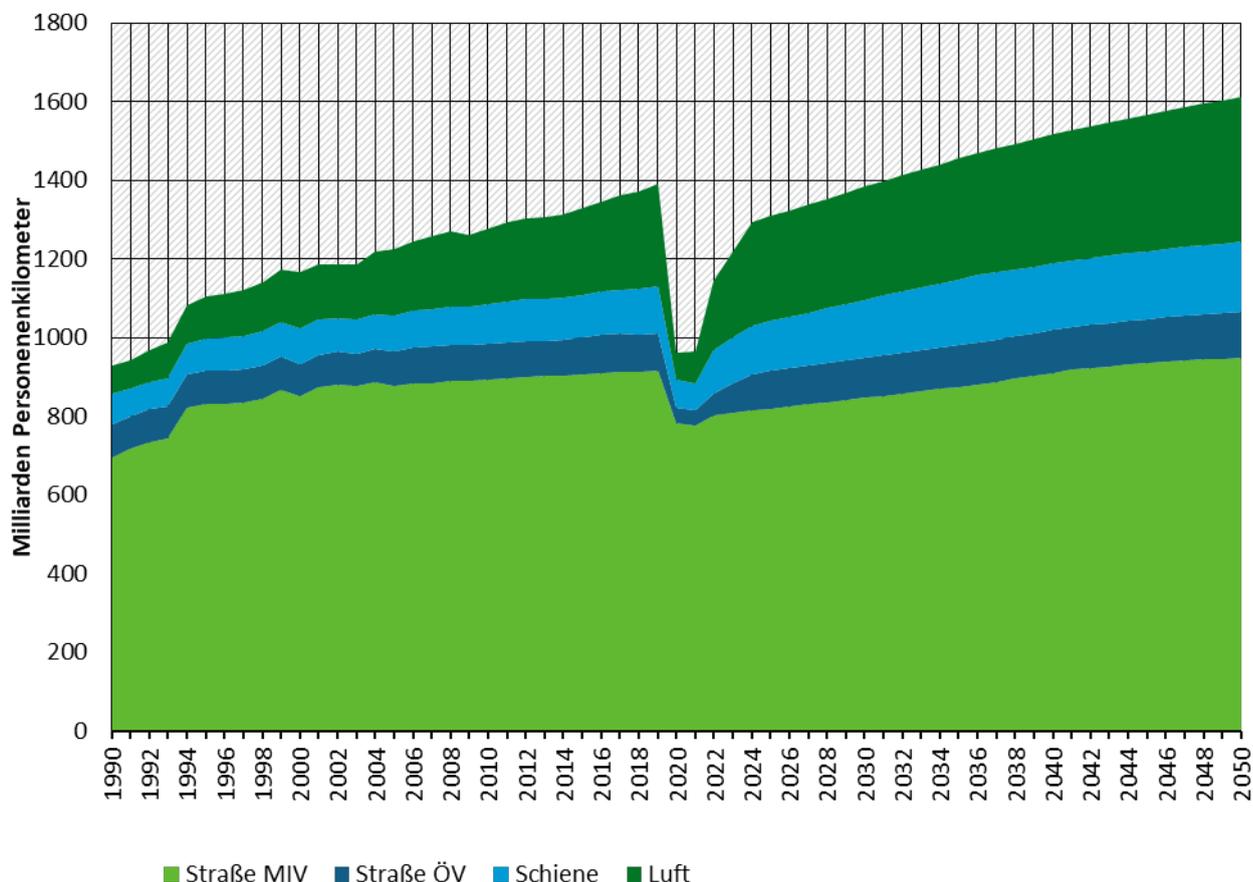
In diesem Kapitel werden ausgewählte Ergebnisse des Verkehrs in Deutschland im Trendszenario dargestellt. Schwerpunkt sind die Ergebnisse für den Inlandsverkehr, wie sie mit TREMOD berechnet wurden. Eine Sonderstellung hat hierbei der Luftverkehr, welcher alle von Deutschland abgehenden und damit auch 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 2021 beruhen auf Realdaten (siehe Kapitel 2), die Ergebnisse für 2022 sind vorläufige Werte, die für die Emissionsbilanz nach Bundesklimaschutzgesetz zum 15.03.2022 erstellt wurden und so als Startjahr im Trendszenario verwendet werden können. Relative Entwicklungen werden auf das letzte Realjahr 2021 oder das letzte Jahr vor der Pandemie (2019) bezogen.

3.7.1 Verkehrs- und Fahrleistungen

Die Verkehrsleistungen des Personenverkehrs sind in Abbildung 18 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 3.6.1) 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 51 % über dem Niveau von 2019 (Flugverkehr: 40%, Busverkehr: 24 %, MIV: 3,4%).

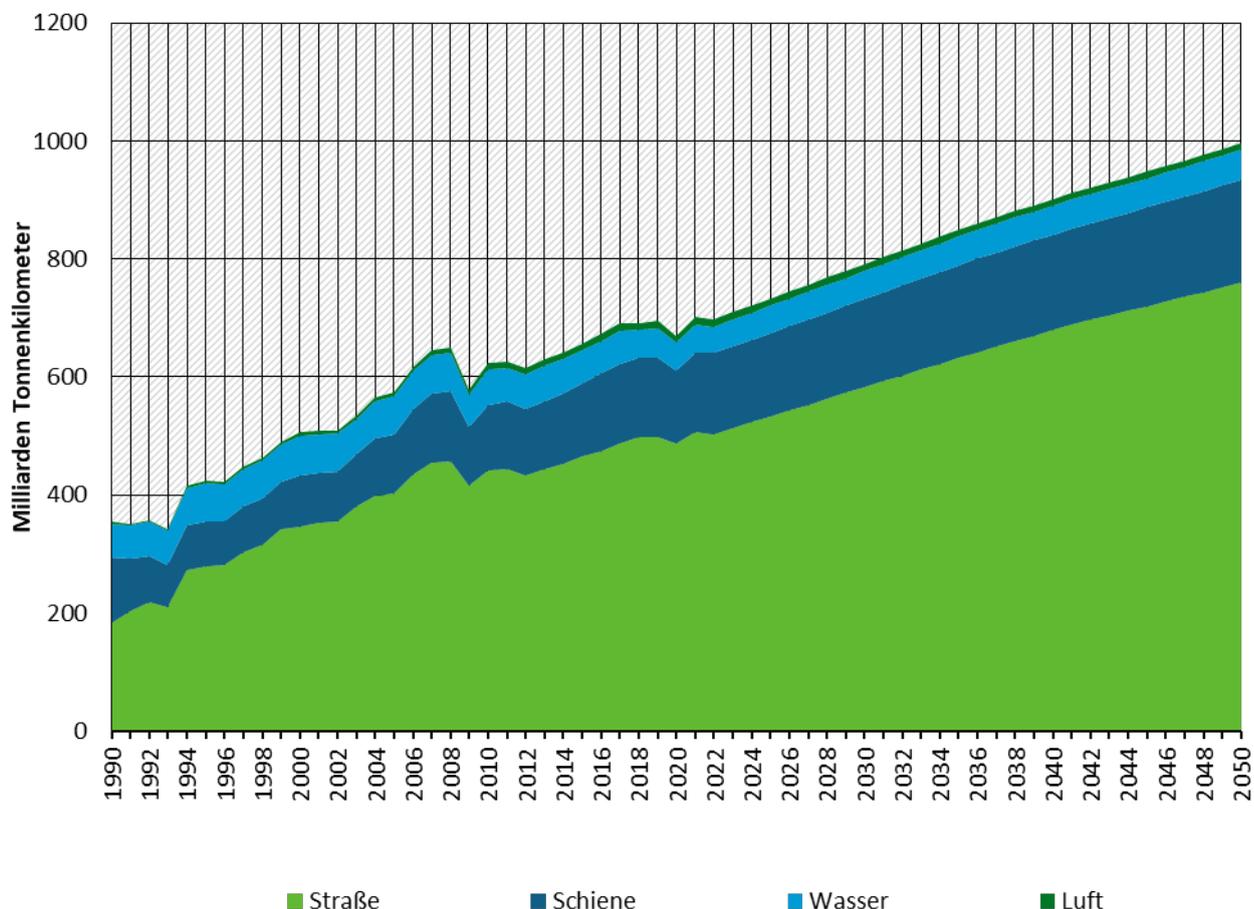
Abbildung 18: Verkehrsleistungen des Personenverkehrs in Deutschland nach Verkehrsträgern von 1990 bis 2021 und im Trendszenario bis 2050



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 2021 real, 2022 vorläufig, ab 2023 Szenario. Quelle: BMDV, Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2022; eigene Berechnungen in TREMOD 6.43 vom 31.03.2023.

Die Verkehrsleistungen des Güterverkehrs sind in Abbildung 19 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 19: Verkehrsleistungen des Güterverkehrs in Deutschland nach Verkehrsträgern von 1990 bis 2021 und im Trendszenario bis 2050

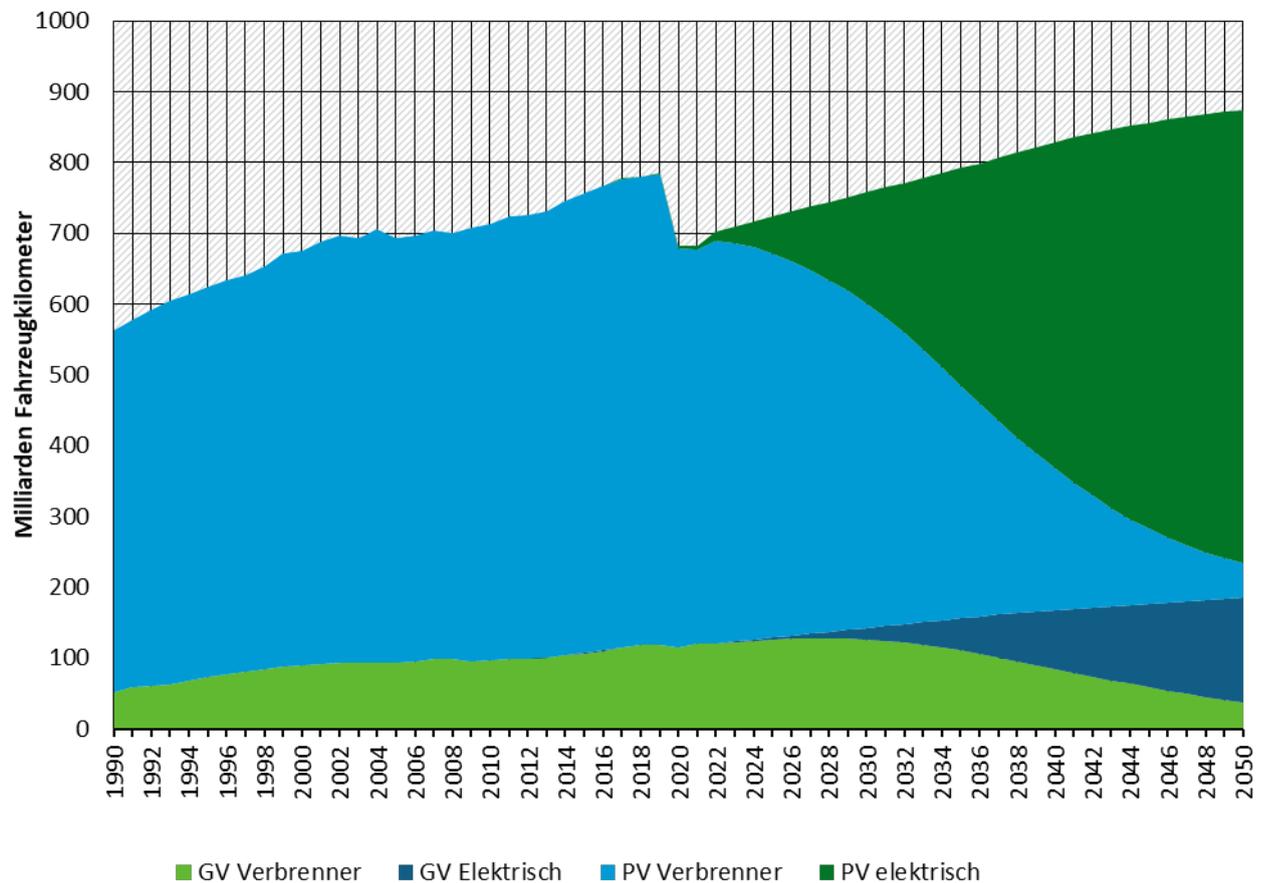


Anmerkungen: Verkehrsleistungen im Inland für Straße (Straßenverkehr mit leichten und schweren Nutzfahrzeugen auf inländischem Territorium), Schiene (Eisenbahn auf inländischem Territorium), Wasser (Güterverkehr mit Binnenschiffen auf inländischem Territorium) und Luft (von Deutschland abgehender Flugverkehr bis zur ersten Zwischenlandung), bis 2021 real, 2022 vorläufig, ab 2023 Szenario. Quelle: Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2022, TREMOD 6.43 vom 31.03.2023.

Die Fahrleistungen des Straßenverkehrs sind in Abbildung 20 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 1 % im Jahr 2021 erreicht, beim Güterverkehr wird es voraussichtlich 2024 sein. Die 10 %-Marke überschreitet der Personenverkehr im Trendszenario im Jahr 2026, der Güterverkehr im Jahr 2030. 50 % werden im Jahr 2036 (PV) bzw. 2041 (GV) erreicht. Im Jahr 2050 liegt der Anteil im Personenverkehr bei 93 %, im Güterverkehr bei 80 %.

Abbildung 20: Fahrleistungen des Straßenverkehrs in Deutschland nach Verkehrsarten und Antrieben von 1990 bis 2021 und im Trendszenario bis 2050



Anmerkungen: Fahrleistungen im Inland; PV: motorisierten Zweiräder, Pkw und Busse; GV: leichte und schwere Nutzfahrzeuge auf inländischem Territorium, bis 2021 real, 2022 vorläufig, ab 2023 Szenario. Quelle: TREMOD 6.43 vom 31.03.2023.

3.7.2 Energieverbrauch und Emissionen

3.7.2.1 Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs nach Energieträgern

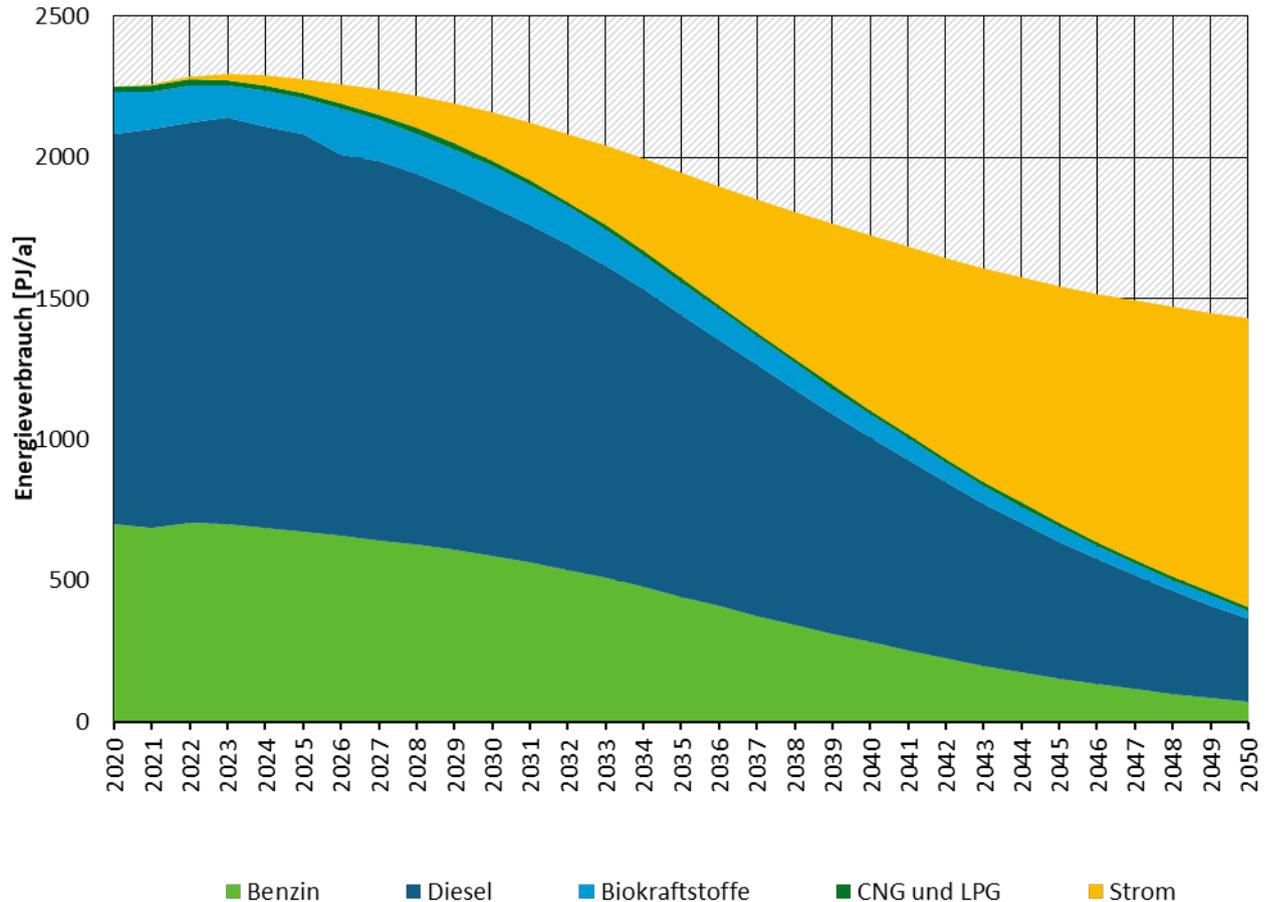
Abbildung 21 zeigt die Entwicklung des Energieverbrauchs des Straßenverkehrs in Deutschland auf inländischem Territorium unterschieden nach den Energieträgern Benzin (ohne Beimischung Bioethanol), Diesel (ohne Beimischung Biodiesel), Biokraftstoffe (Biodiesel, Bioethanol und Biogas), Erdgas (CNG und LNG) und Flüssiggas (LPG) sowie Strom (Kraftfahrzeuge ohne Pe-delecs). 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 2025 zurück und liegt im Jahr 2030 um 13 % unter dem Niveau von 2021. Bis 2050 liegt der Rückgang bei über 80 %.
- ▶ Der Anteil der Biokraftstoffe nimmt kurzfristig noch auf 7 % im Jahr 2026 zu und nimmt nach 2030 langsam ab.
- ▶ CNG 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 8 %, 2050 sind es über 70 %.

Insgesamt nimmt der Energieverbrauch des Straßenverkehrs ab 2024 ab und liegt 2030 um knapp 5 % und 2050 um 37 % unter dem Wert von 2021.

Abbildung 21: Energieverbrauch des Straßenverkehrs in Deutschland nach Energieträgern - Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Trendszenario bis 2050



Anmerkungen: Endenergieverbrauch im Inland, bis 2021 real, 2022 vorläufig, ab 2023 Szenario.

Quelle: TREMOD 6.43 vom 31.03.2023.

3.7.2.2 Endenergieverbrauch aller Verkehrsträger

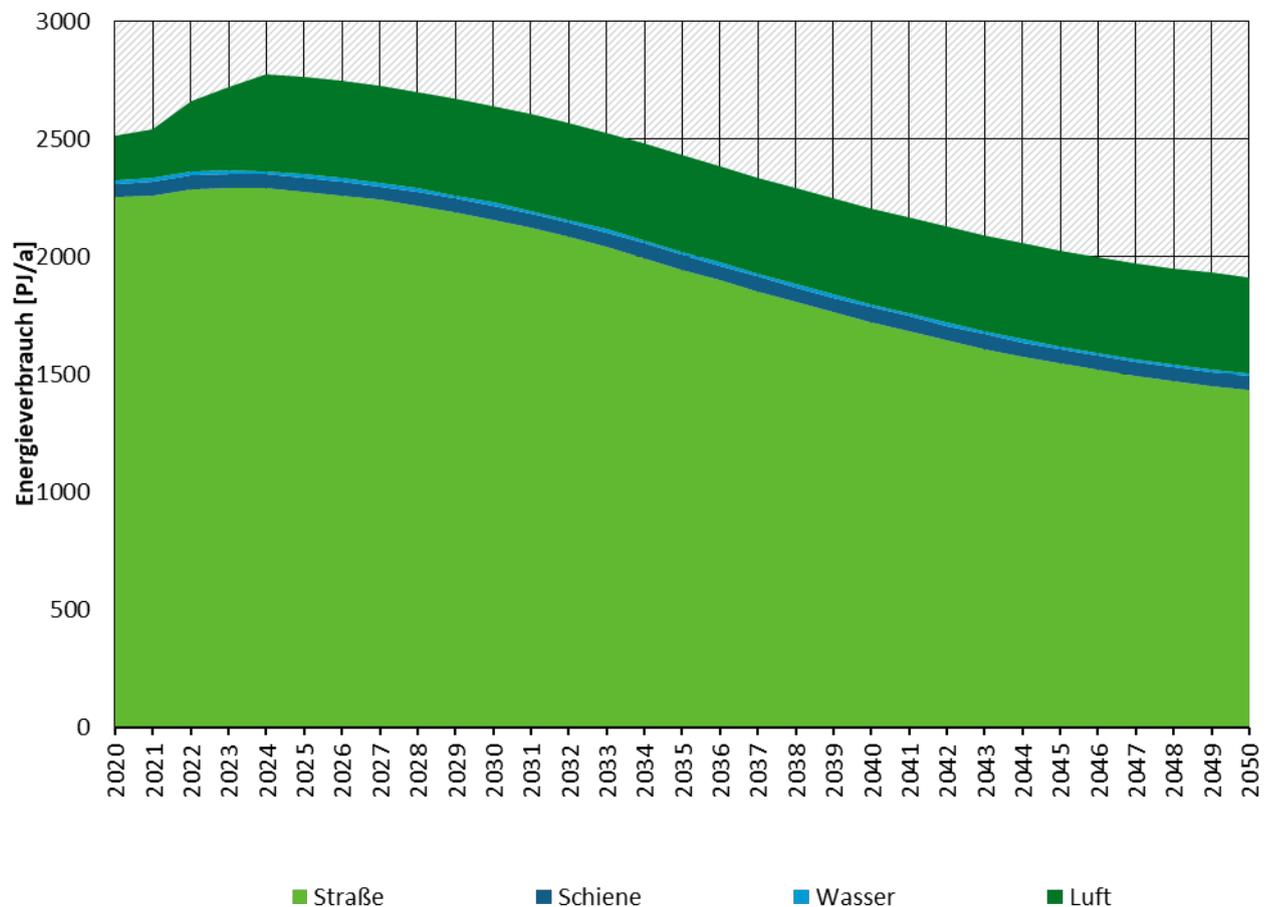
Abbildung 22 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Verkehrs in Deutschland von 2020 bis 2050 für die Verkehrsträger Straße (Straßenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen sowie Bussen auf inländischem Territorium), Schiene (Eisenbahn, Straßen-, Stadt- 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 (90 % im Jahr 2021 bis 75 % im Jahr 2050), gefolgt vom Flugverkehr. Der Energieverbrauch des Straßenverkehrs nimmt von 2021 bis 2030 um 5 % bzw. bis 2050 um 37 % ab.

- ▶ Der Energieverbrauch des Flugverkehrs verdoppelt sich von 2021 bis 2024 und bleibt danach nahezu konstant.
- ▶ Bei der Bahn ist der Energieverbrauch über die gesamte Zeitreihe nahezu gleich.
- ▶ Bei der Binnenschifffahrt geht der Energieverbrauch von 2021 bis 2050 um 28 % zurück.

Der Energieverbrauch nimmt insgesamt für alle betrachteten Verkehrsträger von 2021 bis 2024 noch um fast 10 % zu und danach ab. 2050 liegt der Verbrauch um 25 % unter dem Wert von 2021.

Abbildung 22: Energieverbrauch des Verkehrs in Deutschland - Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Trendszenario bis 2050



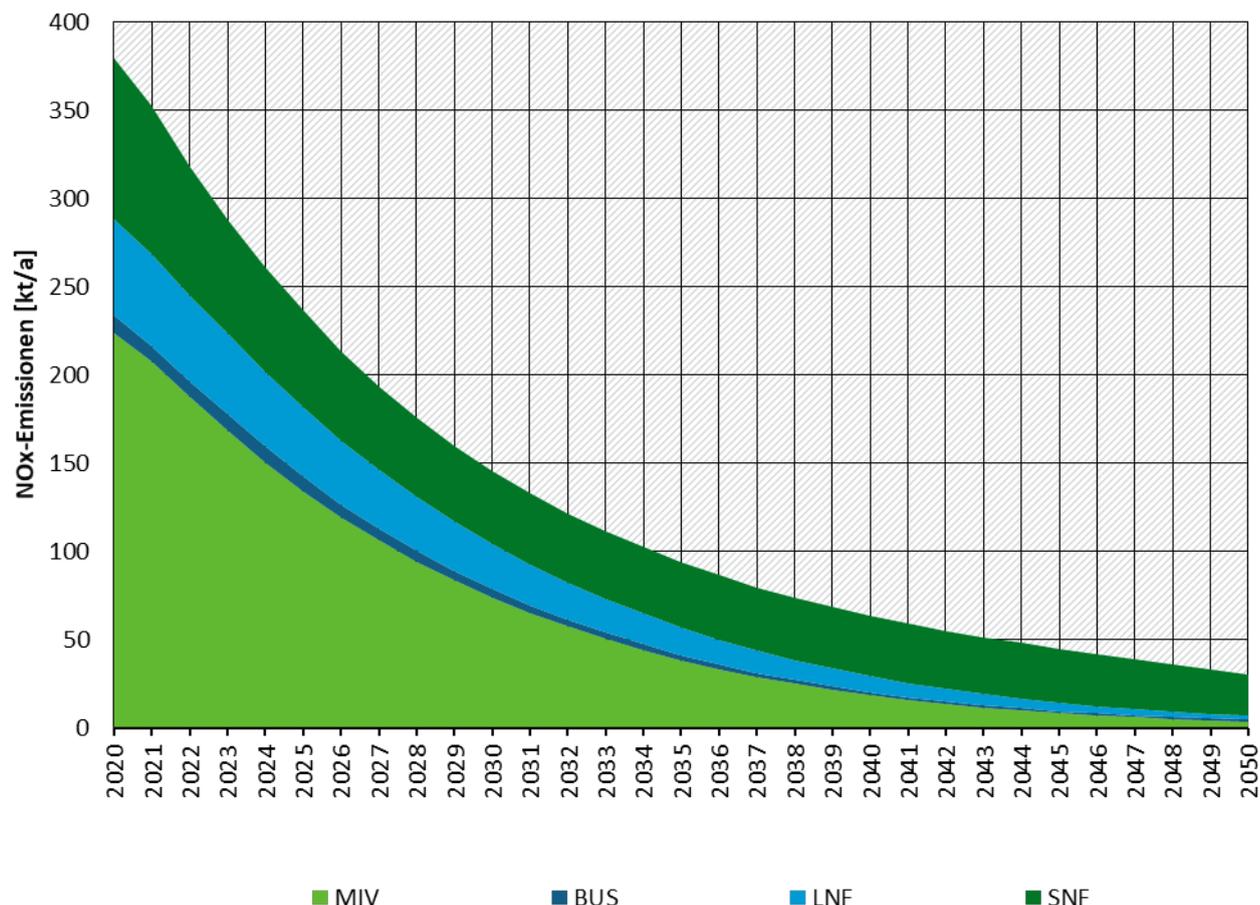
Anmerkungen: Endenergieverbrauch im Inland für Straße (Straßenverkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen sowie Bussen auf inländischem Territorium), Schiene (Eisenbahn, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen auf inländischem Territorium), Wasser (Güterverkehr mit Binnenschiffen auf inländischem Territorium) und Luft (von Deutschland abgehender Flugverkehr bis zur ersten Zwischenlandung); bis 2021 real, 2022 vorläufig, ab 2023 Szenario. Quelle: TREMOD 6.43 vom 31.03.2023.

3.7.2.3 Direkte Abgasemissionen des Straßenverkehrs

Abbildung 23 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 2021 bis 2030 um knapp 60 % und bis 2050 um über 90 % ab. Den stärksten Rückgang hat der MIV (-98 % bis 2050), gefolgt von den LNF (-96 %) und Bussen (-91 %). Die SNF erreichen einen Rückgang von -72 %.

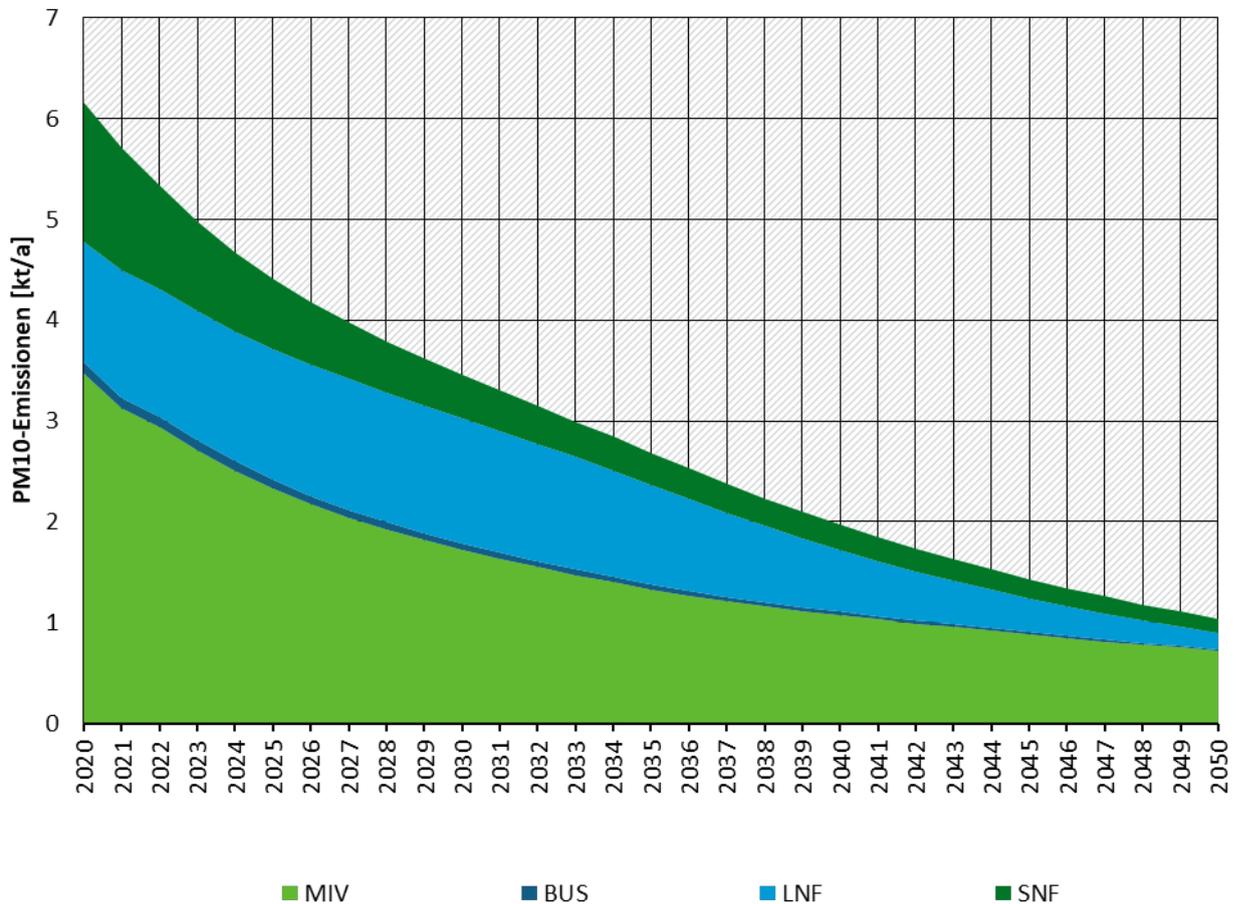
Abbildung 23: Stickstoffoxidemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen im Trendszenario bis 2050



Anmerkungen: Direkte Abgasemissionen im Inland;; bis 2021 real, 2022 vorläufig, ab 2023 Szenario.
Quelle: TREMOD 6.43 vom 31.03.2023.

Abbildung 24 zeigt die Entwicklung der Abgaspartikelemissionen. Diese gehen bis 2050 gegenüber 2021 insgesamt um über 80 % zurück.

Abbildung 24: Abgaspartikelemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland - Entwicklung der direkten Emissionen im Trendszenario bis 2050



Anmerkungen: Direkte Abgasemissionen im Inland; bis 2021 real, 2022 vorläufig, ab 2023 Szenario.

Quelle: TREMOD 6.43 vom 31.03.2023.

3.7.2.4 Treibhausgasemissionen des Verkehrs nach Territorialprinzip

Abbildung 25 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:

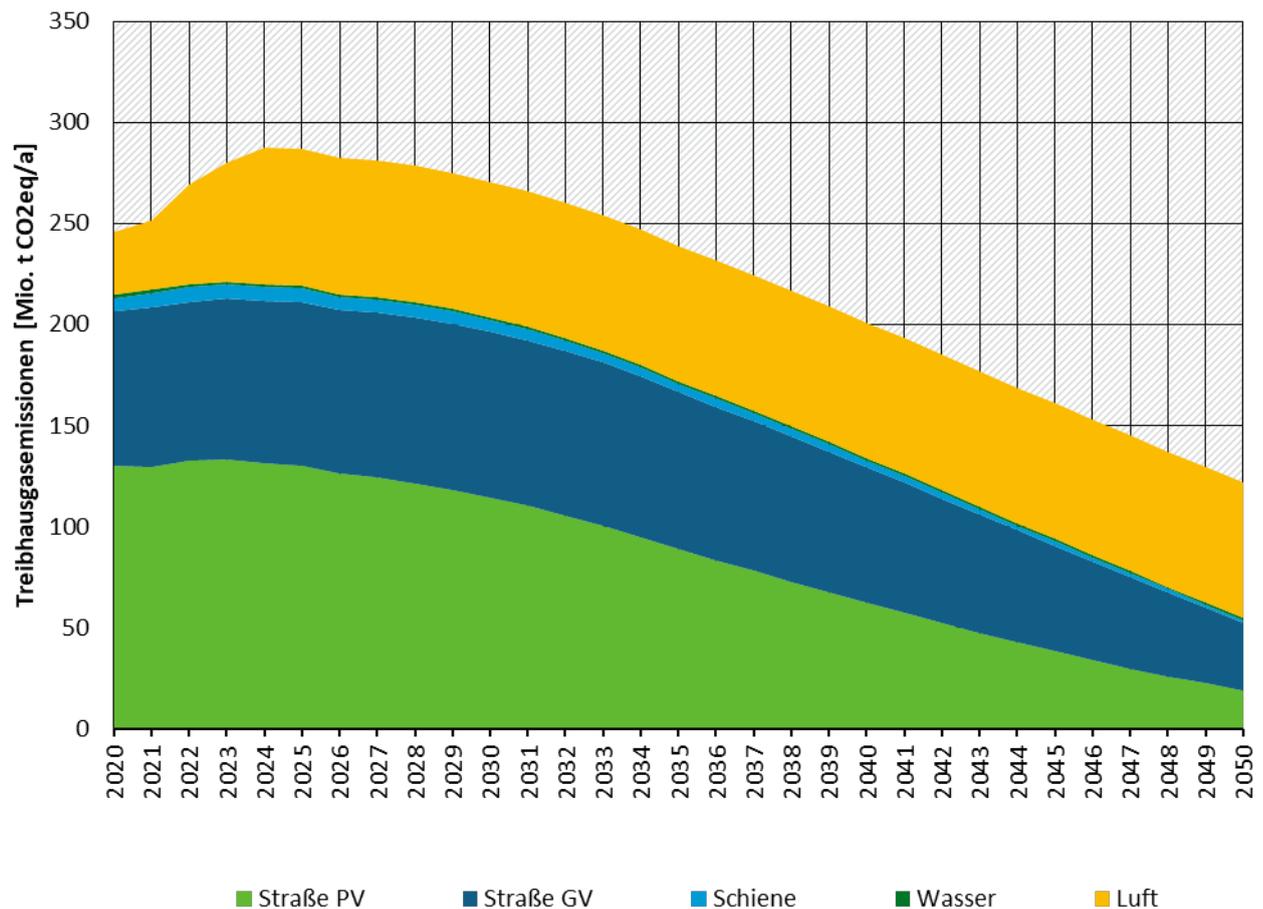
- Der Straßenverkehr hat über die gesamte Zeitreihe den größten Anteil an den Treibhausgasemissionen (83 % im Jahr 2021 bis 43 % Anteil im Jahr 2050), gefolgt zunächst vom Flugverkehr, der nach 2048 der dominante THG-Emittent wird. Die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs gehen von 2021 bis 2030 um 7,5 % und bis 2050 um 75 % zurück. Der größte Rückgang ist beim Personenverkehr (MIV und Bus) festzustellen (-86 %). Beim Gü-

terverkehr (LNF+SNF) liegt der Rückgang nur bei 57 %. Die THG-Emissionen des Straßengüterverkehrs wären dann im Jahr 2050 um 80 % höher als im Personenverkehr (2021 noch 40% weniger).

- ▶ Der Flugverkehr nimmt bis 2024 noch deutlich zu (+96 %) und verharrt danach auf diesem Niveau.
- ▶ Bei der Bahn gehen die Treibhausgasemissionen von 2021 bis 2030 um 23 % und bis 2050 um 82 % zurück.
- ▶ Bei der Binnenschifffahrt gehen die Treibhausgasemissionen von 2021 bis 2030 um 20 % und bis 2050 um 28 % zurück.

Die Treibhausgasemissionen gehen insgesamt für alle betrachteten Verkehrsträger von 2021 bis 2030 nur um 6 % und bis 2050 um 75 % zurück.

Abbildung 25: 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 2021 real, 2022 vorläufig, ab 2023 Szenario.

Quelle: TREMOD 6.43 vom 31.03.2023.

3.7.2.5 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 2023 aktualisierten Treibhausgasbilanz bis zum Jahr 2022 aufsetzt (Umweltbundesamt 2023, S. Umweltbundesamt).

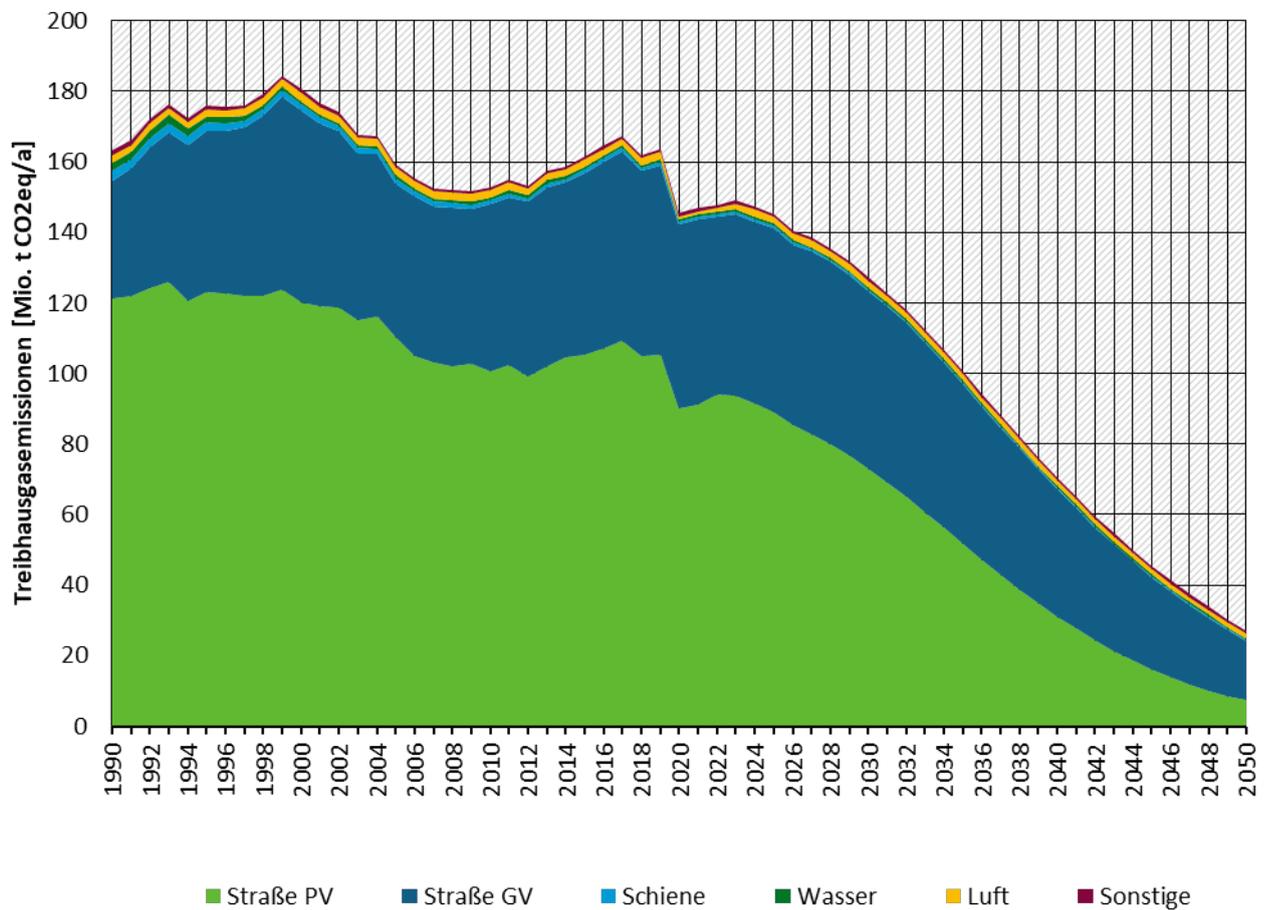
Mit dieser Abgrenzung unterscheiden sich die berichteten Emissionen in der Höhe und im Verlauf von den im Kapitel 3.7.2.4 dargestellten TREMOD-Ergebnissen.

Abbildung 26 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 2021 bis 97 % Anteil im Jahr 2030 und 89 % im Jahr 2050). Insgesamt liegen die THG-Emissionen des Straßenverkehrs im Jahr 2030 um 14 % niedriger als 2021 und 2050 um 83 % unter dem Niveau von 2021.
- ▶ Der Schienen-, Schiffs- und inländische Flugverkehr haben im nationalen Inventar nur einen geringen Anteil. Die THG-Emissionen des Bahnverkehrs nehmen bis 2050 um 70 % ab, die Binnenschifffahrt um 28 %. Der Flugverkehr verdreifacht sich bis 2024 und nimmt danach wieder langsam ab. 2050 sind die THG-Emissionen gegenüber 2021 etwa verdoppelt.

In der Folge gehen die Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland im nationalen Inventar von 2021 bis 2030 um 14 % und bis 2050 um 82 % zurück. Das im KSG festgelegte Sektorziel von 84 Millionen Tonnen in 2030 wird im Trendszenario nicht erreicht. Der berechnete Wert für 2030 liegt mit 126 Mio. Tonnen um 42 Mio. Tonnen und damit um über 50 % über dem Zielwert. Die 84 Mio. Tonnen werden im Trendszenario erst 8 Jahre später unterschritten. Eben- sowenig werden die Nullemissionen im Jahr 2045 (45 Mio. t) und 2050 (27 Mio. t) erreicht.

Abbildung 26: 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 2023 Trendszenario.

Quelle: TREMOD 6.43 vom 31.03.2023; Emissionsübersichten nach Sektoren des Bundesklimaschutzgesetzes 1990 - 2022; Stand: 15.03.2023.

4 Quellenverzeichnis

ACEM (2022): Market | ACEM - The Motorcycle Industry in Europe. Registration in key European markets - 2022 January-September. <https://acem.eu/market-data>. (22.12.2022).

AG Energiebilanzen (2023): Heizwerte 2005 bis 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.): Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. Erscheinungsweise jährlich. 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-CATTRe4257049c177cf191052746afc46d0a3 (10.10.2023).

Allekotte, M.; Biemann, K.; Colson, M.; Fehrenbach, H.; Heidt, C.; Knörr, W.; Kräck, J. (2021): Aktualisierung des „Daten- und Rechenmodells: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland (TREMODO)“ und der Datenbank „Mobile Maschinen und Geräte (TREMODO-MM)“ 2021. ifeu im Auftrag des Umweltbundesamtes, Heidelberg. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-29_texte_116-2020_tremod_2019_0.pdf (31.10.2022).

Althaus, H.-J.; Oberpiller, Q.; Läderach, A.; Hausberger, S.; Matzer, C.; Tiertge, U.; Dornoff, J.; Diaz, S.; Mock, P.; Allekotte, M.; Heidt, C.; Knörr, W.; Eisenmann, C.; Kuhnimhof, T. (2020): Erarbeitung einer Methode zur Ermittlung und Modellierung der CO₂-Emissionen des Kfz-Verkehrs. ICCT, INFRAS, ifeu, TU Graz, DLR im Auftrag des Umweltbundesamtes. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erarbeitung-einer-methode-zur-ermittlung> (19.09.2023).

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

BALM (2023): Mautstatistik. https://www.balm.bund.de/DE/Themen/Lkw-Maut/Mautstatistik/mautstatistik_node.html (10.10.2023).

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

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, IVT Research GmbH, Institut für Verkehrsforschung DLR im 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).

BLE Referat 523 (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 Referat 523 (2022): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2021. https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2021.html (12.05.2023).

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 - 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).

BMF (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. In: Bundesfinanzministerium. https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-der-bundesregierung-zur-umsetzung-des-klimaschutzplans-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=4. (19.09.2023).

BMU (2021): Beschlossene Anpassungen der Treibhausgasminderungsquote (THG-Quote) Infografik BMU.pdf. In: Beschlossene Anpassungen der Treibhausgasminderungsquote (THG-Quote). https://www.bmu.de/media/tx_bmubmedia_media%5Bmedia%5D=1467&cHash=e0d18a7549a6cddff60a3777aa0a6819. (16.11.2021).

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).

BMW (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. <http://www.bmw.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/langfrist-und-klimaszenarien.html> (21.04.2021).

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.

Bundesrat (2021): Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote. https://dejure.org/BGBl/2021/BGBl._I_S._4458 (16.11.2021).

Bundesregierung (2022): EU-Umweltrat: Nur noch CO2-frei fahren. <https://www.bundesregierung.de/bregde/themen/europa/verbrennermotoren-2058450>. (19.09.2023).

DB AG (2022): Jährlich Auswertung der DB- Aktivitätsdaten für TREMOD 2021.

Destatis (2019): Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2018. Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Personenverkehr/Publikationen/Downloads-Luftverkehr/luftverkehr-ausgewahlte-flugplaetze-2080610187004.pdf?__blob=publicationFile (11.12.2020).

DESTATIS (2019): Niedrigwasser beschert Binnenschiffahrt Rekordminus. In: Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2019/03/PD19_112_463.html. (17.01.2020).

Destatis (2021): Personenverkehr mit Bussen und Bahnen 2020. Fachserie 8 Reihe 3.1 <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=statistikTabellen&selectionname=46181#abreadcrumb> (22.02.2022).

Destatis (2022): Beförderungsmenge und Beförderungsleistung nach Verkehrsträgern. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Tabellen/gueterbefoerderung-lr.html?nn=208040>. (28.11.2022).

Deutsche Lufthansa AG (2022): Nachhaltigkeit 2021 - Factsheet. <https://www.lufthansagroup.com/media/downloads/de/verantwortung/LH-Factsheet-Nachhaltigkeit-2021.pdf> (28.11.2022).

DLR; DIW (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).

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).

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 (2022): REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF 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 (2023): 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).

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 (2022): Annual Report 2021. <https://investors.finnair.com/~media/Files/F/Finnair-IR/documents/en/reports-and-presentation/2022/annual-report-2021.pdf> (28.11.2022).

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

FlixBus (2022): Aktivitätsdaten zum Fernlinienbusverkehr von FlixBus für das Jahr 2021 für TREMOD.

Gniffke, P.; Günther, D. (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).

Harthan, R. O.; Repenning, J.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Bürger, V.; Cook, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Ludig, S.; Matthes, F. C.; Mendelewitsch, R.; Moosmann, L.; Scheffler, M.; Wiegmann, K.; Brugger, H.;

Fleiter, T.; Mandel, T.; Rehfeldt, M.; Steinbach, J. (2020): Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung. Climate Change | 33/2020 Öko-Institut, Fraunhofer ISI, I-REES GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit sowie des Umweltbundesamts, Berlin, Karlsruhe. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/abschaetzung-der-treibhausgasminderungswirkung-des> (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 ifeu, INFRAS und FVT 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. Teilbericht UBA FKZ 3713 47 100. Unveröffentlichter Bericht, ifeu, INFRAS. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Heidelberg, Bern.

Hielscher (WiWo), H. (2018): 3000 E-Busse: Vier Städte wollen bis 2030 auf Elektro-Busse umstellen. <https://www.wiwo.de/unternehmen/dienstleister/3000-e-busse-vier-staedte-wollen-bis-2030-auf-elektro-busse-umstellen/23252304.html>. (22.12.2022).

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.; Kuhs, G. (2020): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2019. Climate Change | 13/2020 Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-6> (28.04.2021).

ifeu (in Bearbeitung): Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr. Umweltbundesamt. <https://www.ifeu.de/projekt/analyse-der-umweltbilanz-von-kraftfahrzeugen-mit-alternativen-antrieben-oder-kraftstoffen-auf-dem-weg-zu-einem-treibhausgasneutralen-verkehr/>.

Jöhrens, J. (2022): My eRoads. <https://www.ifeu.de/projekt/my-eroads/>. (22.12.2022).

KBA (2023a): Bestand und Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen in Deutschland für verschiedene Jahre und nach verschiedenen Merkmalen. Sonderauswertung des Kraftfahrt-Bundesamtes für TREMOD. Unveröffentlicht CSV-Datei, .

KBA (2023b): Verkehr in Kilometern - Inländerfahrleistung Zeitreihe 2014-2022 (VK). KBA. https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html (28.11.2022).

KBA (2023c): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge Inlandsverkehr (VD3). KBA. https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/vd_inlandsverkehr/vd_inlandsverkehr_node.html (11.10.2023).

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/TREMODO-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018) - Berichtsteil „TREMODO“. 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 1960-2030“ (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014). ifeu im Auftrag des Umweltbundesamtes. In Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut. S. 1–97. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Endbericht_TREMODO_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 TREMODO. ifeu und INFRAS. Im Rahmen des Projekts „Aktualisierung und Recherche zu Emissionsfaktoren von Euro 5- und Euro 6-Fahrzeugen und nachgerüsteten Kfz und Übertragung der Daten ins Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) und in TREMODO“. FKZ 3711 45 105. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Lauf, Thomas; Memmler, Michael; Schneider, Sven (2022): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Emissionsfaktoren der Stromerzeugung inkl. Vorkette. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energetraeger-2021> (12.10.2023).

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).

Mahmoudi, S.; Frenken, T.; MUVEDA – Hellebrandt & Saeid Mahmoudi GbR (2020): Straßenverkehrszählung 2015 - Ergebnisse. Berichte der BAST, Heft V 327 Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. S. 72. <https://www.bast.de/DE/Statistik/Verkehrsdaten/Manuelle-Zaehlung.html> (13.11.2019).

Matzer, C.; Weller, K.; Dippolt, M.; Lipp, S.; Röck, M.; Rexeis, M.; Hausberger, S. (2019): Update of Emission Factors for HBEFA Version 4.1. TU Graz, Graz. https://www.hbefa.net/d/documents/HBEFA41_Report_TUG_09092019.pdf (20.11.2019).

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. INFRAS, TU Graz, ifeu, IFSTTAR, ADEME, IVL, Bern/Graz/Heidelberg/Lyon/Göteborg. https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA42_Update_Documentation.pdf (03.02.2022).

Notter, B.; Keller, M.; Althaus, H.-J.; Cox, B.; Knörr, W.; Heidt, C.; Biemann, K.; Räder, D.; Jamet, M. (2019): HBEFA 4.1 Development Report. INFRAS, ifeu, Bern, Heidelberg. https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA41_Development_Report.pdf (29.09.2023).

NOW GmbH (2023): MARKTENTWICKLUNG KLIMAFREUNDLICHER TECHNOLOGIEN IM SCHWEREN STRASSEN-GÜTERVERKEHR. 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).

Plötz, P.; Link, S. (2022): Plug-in-Hybride: Der Anfang vom Ende - Fraunhofer ISI. <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/2022/Anfang-vom-Ende-Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge-Europa.html>. (31.03.2023).

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 (2022): e-Bus Radar 2022. PricewaterhouseCoopers GmbH. <https://www.pwc.de/de/branchen-und-markte/oeffentlicher-sektor/e-bus-radar-2022.pdf> (22.12.2022).

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.;

Schlomann, 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).

Samaras, Z.; Ntziachristos, L. (2021): 1.A.3.b.i-iv Road transport 2019 — European Environment Agency. File, <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>. (14.07.2021).

Schmauss, M.; Bawidamann, J.; Friedrich, M.; Haberl, M.; Trenkwalder, L.; Fellendorf, M.; Uhlig, J.; Lohse, R.; Pestel, E. (2023): Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/fluessiger-verkehr-fuer-klimaschutz-luftreinhaltung> (12.10.2023).

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).

Spritmonitor (2023): Eigene Auswertung anhand Daten von Spritmonitor 2023. <https://www.spritmonitor.de/>. (02.02.2023).

Statista (2022): Marktanteile der Fernbusanbieter in Deutschland nach angebotenen Fahrten im Oktober 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/263131/umfrage/marktanteile-der-fernbusanbieter-in-deutschland/> (12.10.2023).

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 (2023): Emissionsübersichten in den Sektoren des Bundesklimaschutzgesetzes. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2023_03_15_em_entwicklung_in_d_ksg-sektoren_pm.xlsx (18.04.2023).

ZIV (2022): ZIV_Marktdatenpraesentation_2022_fuer_Geschaeftsjahr_2021.pdf. https://www.ziv-zwei-rad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/ZIV_Marktdatenpraesentation_2022_fuer_Geschaeftsjahr_2021.pdf (29.11.2022).

A Bestände, Fahrleistungen und Verkehrsleistungen des Busverkehrs

A.1 Vorbemerkungen

Verschiedene Institutionen oder Unternehmen erfassen Daten zu den Fahrleistungen, Verkehrsleistungen, Kapazitäten und Auslastungsgraden im Bereich der Busverkehre. (KBA, DESTATIS, VDV, BDO, Flixbus). Um die weitgehende Konsistenz der o.g. Daten als Grundlagen der Emissionsberechnungen in den TREMOD-Teilkategorien „Linienbus“ / „Fernlinienbus“ / „Sonstige Reisebusse“ zu sichern und die Akzeptanz der Berechnungsergebnisse zu erhöhen, fand im September 2022 ein Fachgespräch mit Expertinnen und Experten von BDO, DESTATIS, DLR, ifeu, UBA und VDV statt.

Das ifeu stellte das bisherige Vorgehen in TREMOD vor. In der Diskussion wurden die offenen Fragen besprochen und Verbesserungsvorschläge formuliert. Als Ergebnis des Workshops wurde die Berechnungsmethode angepasst. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die diskutierten Themen, die daraus entwickelten neuen methodischen Ansätze sowie Aspekte, die noch näher zu prüfen sind oder zukünftig verbessert werden sollten.

A.2 Fahrzeugbestände

Bisheriges Vorgehen in TREMOD

Der Fahrzeugbestand der Busse wird in der Fahrzeugstatistik des KBA nach verschiedenen Merkmalen differenziert (Aufbauart, zul. Gesamtgewicht, Antrieb, Euro-Norm, Anzahl Steh-/Sitzplätze). Eine Zuordnung in die in TREMOD benötigten Kategorien

- ▶ Nah-/Regionallinienbus
- ▶ Reisebus im Fernlinienverkehr
- ▶ Reisebus im Gelegenheitsverkehr und sonstigen Busverkehr

liefert die KBA-Statistik nicht. In TREMOD wurden daher bisher folgende Annahmen für die Zuordnung getroffen:

- ▶ Zuordnung Nahlinienbusse:
Alle Kraftomnibusse mit Aufbauart „Doppel-Tür“ oder „Niederflur“⁸
- ▶ Zuordnung Sonstige Busse inkl. Fernlinienbusse:
Alle sonstigen Aufbauarten ohne die obigen Merkmale, z.B. „Einfach-Tür“, „Gelenkbus“, „Offenes Dach“, „Sonstige“
- ▶ Zuordnung Fernlinienbusse:
Für TREMOD werden Bestandsdaten der Fernlinienbusse von Flixbus, differenziert nach Gewichtsklasse und Euro-Norm (i.d.R. mehr Euro V und VI als sonstige Busse) zur Verfügung gestellt. Diese Bestände werden als repräsentativ für den Fernlinienbusverkehr angesehen. Die Anzahl der Busse wird entsprechend dem Marktanteil von Flixbus hochskaliert (in 2018

⁸ In früheren Auswertungen wurde die Anzahl an Steh- und Sitzplätzen zur Unterscheidung der Linienbusse und Reisebusse verwendet. Die Ergebnisse waren aber nicht plausibel und lieferten zu wenige Linienbusse, da zu wenige Busse mit Stehplätzen im KBA-Bestand ausgewiesen waren.

aus einer DESTATIS Auswertung (Statista 2022) festgelegt und für die nächsten Jahre konstant gelassen) und von den sonstigen Bussen abgezogen.

Ergänzende Informationen aus dem Workshop

Im Kontext der Homologation (auch im Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge) werden die Buskategorien

- ▶ M3 I: Stadtlinienbus
- ▶ M3 II: Überlandlinienbus
- ▶ M3 III: Reisebus

unterschieden (Dokumente erhalten vom VDV). Das KBA veröffentlicht diese Zuordnung nicht standardmäßig. Das ifeu fragt daher bei der Datenanfrage im kommenden Jahr beim KBA nach, ob diese Informationen zukünftig zur Verfügung gestellt werden können.

Ein Hinweis wurde gegeben, dass Gelenkbusse nur als Stadtlinienbus eingesetzt sind. Ifeu wird bei der Überarbeitung des Bestands die entsprechenden Anpassungen durchführen.

Bezüglich der Bestandszahlen wurden folgende Punkte angemerkt:

- ▶ Die von ifeu vorgestellten Bestandszahlen entsprechen nicht der Veröffentlichung auf der KBA-Homepage. Dieser Punkt wird von ifeu noch überprüft.
- ▶ Der VDV erfasst in seiner Statistik rund 45.000-50.000 Stadtlinienbusse.
- ▶ DESTATIS erstellt alle fünf Jahre eine Unternehmensstatistik, zuletzt 2019. Danach gab es 48.000 Busse im Liniennahverkehr und 15.000-20.000 Überlandlinienbusse

Das ifeu wird die Bestandszahlen zunächst weiter erfassen und gegenüberstellen. Falls das KBA die Busbestände nach den drei Klassen zur Verfügung stellen kann, werden die Zahlen im kommenden Jahr mit der Verschiebung der Gelenkbusse von der Buskategorie SRBus zu den Linienbussen entsprechend angepasst. Die Kategorie SRBus (sonstige Reisebusse) wird 2023 aus Transparenzzwecken ggf. neu benannt, z.B. sonstige Busse (SBus), falls ein Teil der Busse in dieser Kategorie keine Reisebusse sind. Diese Anpassungen wurden in der aktuellen TREMOD-Version 6.43 noch nicht umgesetzt. Tabelle 93 fasst die Buskategorien und deren Merkmale (aktuelle und geplante) zusammen.

Tabelle 92: Kategorien des Busverkehrs

Verkehrsart DESTATIS (gewerblich)	Fahrzeugart in TREMOD (bisherige Zuordnung)	Fahrzeugart in KBA (bisherige Merkmale)	Änderungen (geplant)
Liniennahverkehr (gewerblich)	Linienbus	Aufbauart „Doppeltür“ oder „Niederflur“	Zuordnung M3 I und M3 II; wenn möglich; Zuordnung Gelenkbusse
Linienfernverkehr (gewerblich)	Fernlinienbus	Nach Flixbus	Hochrechnung auf alle Unternehmen überprüfen
Gelegenheitsverkehr (gewerblich) Nicht-gewerblicher Busverkehr	Sonstiger Reisebus	Gesamtbestand ohne Aufbauart „Doppeltür“ oder „Niederflur“ und „Flixbus“	Zuordnung M3-III wenn möglich, ohne Gelenkbusse, ggf. Identifizierung sonstiger Busse

A.3 Fahrleistungen

In TREMOD wird der Busverkehr im Inland bilanziert. Die Inlandsfahrleistung des gesamten Busverkehrs wurde in der Vergangenheit bei den Fahrleistungserhebungen 1993, 2002 und 2014 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen erhoben. Eine kontinuierliche Erfassung des Busverkehrs erfolgt bei den Straßenverkehrszählungen lediglich für die Autobahnen und die außerörtlichen Bundesstraßen.

Das KBA veröffentlicht seit 2014 die Inländerfahrleistungen der Busse, basierend auf den Tachoständen bei den Hauptuntersuchungen der Fahrzeuge (KBA 2023b) Nach der Fahrleistungserhebung 2014 unterscheidet sich die Inländerfahrleistung nur unwesentlich von der Inlandsfahrleistung, da sich die Fahrleistung der Ausländer im Inland und die Fahrleistung der Inländer im Ausland in etwa ausgleichen. Daher wird in TREMOD die Inlandsfahrleistung für die Jahre 2014 bis 2019 gleich der Inländerfahrleistung nach KBA gesetzt.

Für die Jahre ab 2020 kann die Inländerfahrleistung des KBA nicht verwendet werden, da die bisherige Methode es nicht erlaubt, den pandemiebedingten Rückgang der Fahrleistungen korrekt abzubilden (ähnlich für alle anderen Fahrzeugkategorien). Für die Jahre 2020 und danach wurde daher auf Grundlage der Erkenntnisse des Workshops ein anderes Verfahren zur Ableitung der Fahrleistungen entwickelt.

Zunächst wird das Vorgehen bis 2019 beispielhaft für das Jahr 2019 beschrieben. Anschließend wird das Vorgehen für 2020 und 2021 dargestellt.

Fahrleistungen des Linienfernverkehrs, Liniennahverkehrs und sonstigen Busverkehrs

1. Fahrleistungen im Jahr 2019

Die Fahrleistungen des Busverkehrs im Jahr 2019 sind in Tabelle 93 dargestellt. Der nachfolgende Text beschreibt das Vorgehen. Die Zeilennummern der Tabelle sind in Klammern angegeben. Das Vorgehen für die Jahre 2020 und 2021 wird separat erläutert und in Tabelle 94 und Tabelle 95 dargestellt. Die Genauigkeit der Zahlenangaben dienen der besseren Nachvollziehbarkeit der Werte.

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. Die Fahrleistung des gewerblichen Busverkehrs im Inland lag somit im Jahr 2019 bei 3,166 Mrd. km (6).

Laut KBA-ViK lag die Fahrleistung der Busse insgesamt bei 4,617 Mrd. km (7). Damit besteht eine Differenz zum gewerblichen Verkehr von 1,451 Mrd. km (8). Diese wird als „Nicht-gewerblicher Busverkehr“ bezeichnet. In TREMOD wird der Nicht-gewerbliche Busverkehr (8) mit dem gewerblichen Gelegenheitsverkehr (5) zum sonstigen Busverkehr (9) zusammengefasst.

Tabelle 93: Fahrleistungen des Busverkehrs im Jahr 2019 im Inland in TREMOD

Zeile	Verkehrsart	Bezug	Quelle	Fahrleistung (Mrd. km)
1	Linienfernverkehr	Inland	46181-002	0,128
2	Liniennahverkehr	Inland (=gesamt)	46181-010	2,593
3	Gelegenheitsnahverkehr	Inland (=gesamt)	46181-010	0,068
4	Gelegenheitsfernverkehr	Inland	46181-002	0,376
5	Gelegenheitsverkehr	Inland	(3)+(4)	0,445
6	Gewerblicher Verkehr	Inland	(1)+(2)+(3)+(4)	3,166
7	Gesamter Busverkehr	Inland (=Inländer)	KBA-ViK	4,617
8	Nicht-gewerblicher Busverkehr	Inland	(7)-(6)	1,451
9	Sonstiger Busverkehr	Inland	(5)+(8)	1,896

Quelle: DESTATIS, KBA, eigene Berechnungen

2. Fahrleistungen im Jahr 2020

Die Inlandsfahrleistung des gesamten Busverkehrs wurde letztmalig in der Fahrleistungserhebung 2014 erfasst. Das KBA erstellt mit „Verkehr in Kilometern“ eine Zeitreihe der Inländerfahrleistung ab 2014 bereit. Diese Zeitreihe wurde verwendet, um die Fahrleistungen bis 2019 fortzuschreiben. Die auf Tachostandmessungen beruhende Methodik erfasst jedoch lediglich die kumulierte Fahrleistung der Busse, die auf die einzelnen Bezugsjahre aufgeteilt wird. Diese Methode ist nicht geeignet, deutliche Veränderungen der Fahrleistungen in einem Jahr abzubilden, wie es für die Jahre 2020 und 2021 aufgrund der Einschränkungen durch die Maßnahmen zur Eindämmung der Corona-Pandemie eingetreten ist. Aus diesem Grund können die Fahrleistungen von KBA-ViK ab 2020 nicht verwendet werden. Die Gesamtfahrleistung muss also berechnet werden (siehe Tabelle 94).

Die Fahrleistungen für den Gewerblichen Verkehr wurden aus DESTATIS übernommen. Insgesamt hatte der Gewerbliche Busverkehr eine Fahrleistung von 2,634 Mrd. km (6). Dabei ging die Fahrleistung des Linienverkehrs nur um knapp 4 % zurück, während der Fernlinienfernverkehr und der Gelegenheitsverkehr mit -62% bzw. -79% pandemiebedingt deutlich einbrachen.

Für den Nicht-gewerblichen Busverkehr liegen, wie bereits dargelegt, keine Informationen vor. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese Verkehre von Unternehmen, anderen Institutionen und privaten Betreibern pandemiebedingt ebenfalls stark zurückgegangen sind. Daher wurde angenommen, dass sich die Fahrleistung von 2019 bis 2020 mit der gleichen Rate geändert hat wie der Gelegenheitsverkehr im Inland (-79%). Er ging damit auf 0,31 Mrd. km (8) zurück. Damit lag die Gesamtfahrleistung 2020 bei 2,944 Mrd. km (7) und damit 36% niedriger als 2019.

Tabelle 94: Fahrleistungen des Busverkehrs im Jahr 2020 im Inland in TREMOD

Zeile	Verkehrsart	Bezug	Quelle	Fahrleistung (Mrd. km)
1	Linienfernverkehr	Inland	46181-002	0,049
2	Liniennahverkehr	Inland (=gesamt)	46181-010	2,491

Zeile	Verkehrsart	Bezug	Quelle	Fahrleistung (Mrd. km)
3	Gelegenheitsnahverkehr	Inland (=gesamt)	46181-010	0,017
4	Gelegenheitsfernverkehr	Inland	46181-002	0,078
5	Gelegenheitsverkehr	Inland	(3)+(4)	0,095
6	Gewerblicher Verkehr	Inland	(1)+(2)+(3)+(4)	2,634
7	Gesamter Busverkehr	Inland (=Inländer)	(6)+(8)	2,944
8	Nicht-gewerblicher Busverkehr	Inland	Gleiche Änderung ggü. 2019 wie (5)	0,310
9	Sonstiger Busverkehr	Inland	(5)+(8)	0,405

Quelle: DESTATIS, eigene Berechnungen

3. Fahrleistungen im Jahr 2021

Für das Jahr 2021 lagen im September 2022 keine Informationen zu den Fahrleistungen aus DESTATIS vor. Daher wurde die Fahrleistung, in Abstimmung mit DLR und Intraplan, wie folgt geschätzt:

- ▶ Linienfernverkehr: Änderung gegenüber 2020 in Anlehnung an die Angaben von Flixbus (-29%).
- ▶ Liniennahverkehr: keine Änderung
- ▶ Sonstiger Busverkehr: Abnahme der Fahrleistung gegenüber 2020 um -10%.

Die resultierenden Fahrleistungen sind in Tabelle 95 zusammengefasst. Die gesamte Fahrleistung der Busse nahm damit 2021 gegenüber 2020 um knapp 2% auf 2,890 Mrd. km ab.

Tabelle 95: Fahrleistungen des Busverkehrs im Jahr 2021 im Inland in TREMOD

Zeile	Verkehrsart	Bezug	Quelle	Fahrleistung (Mrd. km)
1	Linienfernverkehr	Inland	Flixbus: -29% ggü. 2020	0,034
2	Liniennahverkehr	Inland (=gesamt)	Wie 2020	2,491
3	Gelegenheitsnahverkehr	Inland (=gesamt)	Annahme: -10% ggü. 2020	0,015
4	Gelegenheitsfernverkehr	Inland	Annahme: -10% ggü. 2020	0,070
5	Gelegenheitsverkehr	Inland	(3)+(4)	0,086
6	Gewerblicher Verkehr	Inland	(1)+(2)+(3)+(4)	2,611
7	Gesamter Busverkehr	Inland (=Inländer)	(6)+(8)	2,890
8	Nicht-gewerblicher Busverkehr	Inland	Gleiche Änderung ggü 2020 wie (5)	0,279
9	Sonstiger Busverkehr	Inland	(5)+(8)	0,365

Quelle: DESTATIS, eigene Berechnungen

A.4 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 kann jedoch in Beziehung zur Gesamtverkehrsleistung (Inland und grenzüberschreitend) gesetzt werden.

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 ist. Damit lässt sich die Verkehrsleistung je Verkehrsart für die Inlandsstrecken aus der Fahrleistung im Inland multipliziert mit der Auslastung (gesamt) berechnen. Für den nicht-gewerblichen Busverkehr wird die Auslastung des Gelegenheitsverkehrs angesetzt. Die folgenden Tabellen zeigen die Eingangsgrößen der Berechnung: Fahrleistung gesamt (Tabelle 96), Verkehrsleistung gesamt (Tabelle 97), Berechnete Auslastung (Tabelle 98) und die berechneten Verkehrsleistungen im Inland (Tabelle 99) für die Jahre 2019 und 2020.

Tabelle 96: Fahrleistungen des Busverkehrs von Destatis im Jahr 2019 und 2020 im Inland und Ausland

Fahrleistungen in Mrd. km

Zeile	Verkehrsart	Bezug	Quelle	2019	2020
1	Linienfernverkehr	Gesamt (Inland+Ausland)	46181-010	0,194	0,072
2	Liniennahverkehr	gesamt (=Inland)	46181-010	2,593	2,491
3	Gelegenheitsnahverkehr	gesamt (=Inland)	46181-010	0,068	0,017
4	Gelegenheitsfernverkehr	Gesamt (Inland+Ausland)	46181-010	0,544	0,101
5	Gelegenheitsverkehr	Gesamt	(3+4)	0,612	0,119

Quelle: DESTATIS

Tabelle 97: Verkehrsleistungen des Busverkehrs im Jahr 2019 und 2020 im Inland und Ausland

Verkehrsleistungen in Mrd. Pkm im Inland und Ausland

Zeile	Verkehrsart	Bezug	Quelle	2019	2020
1	Linienfernverkehr	gesamt	46181-010	6,299	1,859
2	Liniennahverkehr	gesamt (=Inland)	46181-010	38,310	29,307
3	Gelegenheitsnahverkehr	gesamt (=Inland)	46181-010	1,142	0,283
4	Gelegenheitsfernverkehr	gesamt	46181-010	15,536	2,567
5	Gelegenheitsverkehr	Gesamt	(3+4)	16,677	2,850

Quelle: DESTATIS

Tabelle 98: Auslastung des Busverkehrs im Jahr 2019 und 2020 im Inland und Ausland

Auslastung, Anzahl der besetzten Sitze (Personen-km/Fahrzeug-km)

Zeile	Verkehrsart	Bezug	Quelle	2019	2020
1	Linienfernverkehr	gesamt	berechnet VL/FL	32,5	25,9
2	Liniennahverkehr	gesamt	berechnet VL/FL	14,8	11,8
5	Gelegenheitsverkehr	gesamt	berechnet VL/FL	27,2	24,0

Quelle: eigene Berechnungen

Tabelle 99: Verkehrsleistungen des Busverkehrs im Jahr 2019 und 2020 im Inland in TREMOD

Verkehrsleistungen in Mrd. Pkm im Inland (berechnet)

Zeile	Verkehrsart	Bezug	Quelle	2019	2020
1	Linienfernverkehr	Inland	FL Inland (1) * Auslastung (1)	4,149	1,260
2	Liniennahverkehr	Inland	Destatis	38,310	29,307
5	Gelegenheitsverkehr	Inland	FL Inland (5)* Auslastung (5)	12,115	2,285
8	Nicht gewerblicher Busverkehr	Inland	FL Inland (8)* Auslastung (5)	39,529	7,457
9	Sonstiger Busverkehr	Inland	(5)+(8) bzw. FL Inland (9)* Auslastung (5)	51,644	9,742

Quelle: eigene Berechnungen

Für das Jahr 2021 liegen bisher keine Verkehrsleistungen für das ganze Jahr vor. Die Verkehrsleistungen werden daher mit Veränderungsdaten gegenüber 2020 geschätzt. Das Vorgehen wurde in einem Fachgespräch mit DLR und Intraplan abgestimmt (siehe Tabelle 100).

Tabelle 100: Verkehrsleistungen des Busverkehrs im Jahr 2021 im Inland in TREMOD

Verkehrsleistungen in Mrd. Pkm im Inland (berechnet auf Basis der geschätzten Veränderungsdaten)

Zeile	Verkehrsart	Bezug	Quelle	2021	2020-2021
1	Linienfernverkehr	Inland	Änd. ggü. 2020: Flixbus	0,892	-29,1%
2	Liniennahverkehr	Inland	Änd. ggü. 2020: Abstimmung DLR/Intraplan	27,813	-5,10%
5	Gelegenheitsverkehr	Inland	Änd. ggü. 2020: Abstimmung DLR/Intraplan	2,057	-10,00%
8	Nicht gewerblicher Busverkehr	Inland	Änd. ggü. 2020: Abstimmung DLR/Intraplan	6,711	-10,00%
9	Sonstiger Busverkehr	Inland	(5)+(8)	8,768	-10,00%

A.5 Fazit und weiteres Vorgehen

Die Statistik des gewerblichen Busverkehrs in Deutschland von DESTATIS erfasst die Verkehre der Unternehmen mit Sitz in Deutschland. Daher sind weder die Verkehre von ausländischen Unternehmen in Deutschland noch der nicht-gewerbliche Busverkehr erfasst. Da es für diese Verkehre auch zukünftig keine statistischen Daten geben wird, müssen sie auch weiterhin abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse von DESTATIS liegen auch in den nächsten Jahren zum Zeitpunkt der Erstellung des Emissionsinventars für das Vorjahr nicht vor, so dass die Fahr- und Verkehrsleistungen für das aktuelle Vorjahr anderweitig abgeschätzt werden müssen. Für den Fernlinienbusverkehr kann hierbei auf die Vorabinformationen von Flixbus zurückgegriffen werden. Für den Linienahverkehr liegen erste Verkehrsleistungsdaten aus der Vierteljahresstatistik vor, die sich jedoch erfahrungsgemäß von den endgültigen Werten deutlich unterscheiden können. Aktuell wurde daher für das Jahr 2021 in Abstimmung mit DLR und Intraplan die relative Entwicklung der Verkehrsleistung der Straßen- und Stadtbahnen zur Fortschreibung zugrunde gelegt.

Die Inlandsfahrleistung des gesamten Busverkehrs wurde letztmalig in der Fahrleistungserhebung 2014 erfasst. Die Fahrleistungen aus „Verkehr in Kilometern“ konnte bis 2019 verwendet werden aber die Methode ist nicht geeignet, um deutliche Veränderungen der Fahrleistungen in einem Jahr abzubilden, (wie es für die Jahre 2020 und 2021 eingetreten ist). Aus diesem Grund wurden die Fahrleistungen von KBA-ViK ab 2020 nicht mehr verwendet.

Eine verbesserte Datenbasis könnte in den nächsten Jahren zur Verfügung stehen, aber nach derzeitigem Kenntnisstand nicht vor 2025. Mögliche zukünftige Datengrundlagen könnten z.B. sein:

- ▶ Ergebnisse aus KBA-ViK mit einer angepassten Methodik
- ▶ Neue Erfassungssysteme von DESTATIS
- ▶ Mobilitätsdaten und andere Verkehrserfassungsdaten
- ▶ Fahrplandaten
- ▶ Neue Fahrleistungserhebung (Durchführung geplant in 2024),

B Biokraftstoffe und synthetische Kraftstoffe zur Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben zur THG-Minderung

B.1 Biokraftstoffe

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

- ▶ Bis 2020: Das (BImSchG §37 zweiter Abschnitt) erweitert durch die 38. BImSchV stellen die nationale Umsetzung der europäischen Erneuerbaren Energien Richtlinie RED I (EU-Richtlinie 2009/28/EG) und der Kraftstoffqualitätsrichtlinie (EU-Richtlinie 2009/30/EG) dar.
- ▶ Bis 2030: Für den Zeitraum nach 2020 bis 2030 haben Rat und Parlament der EU im Dezember 2018 die Verordnung (EU) 2018/2001 als Neufassung der Erneuerbare Energien-Richtlinie (RED II) veröffentlicht (siehe (EU 2018)). Das Regelwerk umfasst verschiedene Quoten und Anrechnungsmöglichkeiten in Abhängigkeit der erneuerbaren Energieträger, darunter konventionelle Biokraftstoffe, erneuerbarer Strom und fortschrittliche Biokraftstoffe („advanced biofuels“).
- ▶ Die RED II wurde in nationales Recht über die Anpassung des sogenannten „Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgas-minderungsquote“ umgesetzt (Bundesrat 2021). Das Gesetz wurde am 29.09.2021 im Bundesgesetzblatt verkündet und ist am 01.10.2021 in Kraft getreten. Mit der neuen Treibhausgas-Mindestquote soll der Anteil erneuerbarer Energien im Verkehr bis 2030 auf 32 % steigen. Die Zielvorgaben sind in Abbildung 27 enthalten.

Abbildung 27: Beschlossene Anpassungen des Gesetzes zur Weiterentwicklung der Treibhausgas-minderungsquote

Überblick Umsetzung RED II, Änderung des Bundestages

	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
THG-Quote (CO ₂ -Minderung) laut Bundestagsbeschluss vom 25. Mai 2021	7 %	8 %	9,25 %	10,5 %	12 %	14,5 %	17,5 %	21 %	25 %
THG-Quote (CO ₂ -Minderung) laut Entwurf der Bundesregierung	6,5%	7%	8%	8%	10%	10%	14,5%	14,5%	22%
Nahrungs- und Futtermittelpflanzen (Obergrenze, energetisch)	4,4 %								
Altspeiseöle und tierische Fette (Obergrenze, energetisch)	1,9 %								
Fortschrittliche Biokraftstoffe (Mindestanteil, energetisch)	2022	2023	2024	2025	2026	2028	2030		
	0,2 %	0,3 %	0,4 %	0,7 %	1,0 %	1,7 %	2,6 %		
	Mengen oberhalb des Mindestanteils werden mit Faktor 2 angerechnet.								
	POME wird nur einfach angerechnet, ist weiterhin auf den Mindestanteil anrechenbar.								
Wasserstoff und PtX-Kraftstoffe	Mengen werden mit Faktor 2 angerechnet (Raffinerien und Straßenverkehr)								
Strom	Mengen werden mit Faktor 3 angerechnet (Strom aus öffentlichen Ladepunkten, private Elektrofahrzeuge, Fahrzeugflotten)								
Luftverkehr	Quote für PtL-Kerosin: 0,5 % in 2026, 1 % in 2028, 2 % in 2030								
Palmöl	2022					ab 2023			
	0,9 %					0 %			
Co-Processing	Gesetzlicher Ausschluss bleibt; Bundestag fordert die Bundesregierung auf (Entscheidung), die Anrechenbarkeit durch BImSchV zu ermöglichen. Gemäß BImSchG dürfen nur Reststoffe (Anhang IX Teil A der RED II, fortschrittliche Biokraftstoffe) eingesetzt werden.								
UER-Maßnahmen	Können nur noch bis einschließlich 2026 angerechnet werden								
Biogener Wasserstoff	Einsatz in Straßenfahrzeugen (nicht in Raffinerien) aus Reststoffen (Anhang IX Teil A) wird ab dem 1.7.2023 angerechnet. BImSchV regelt notwendige Kriterien.								
Sonstiges	Verweis auf unvergällten Alkohol bleibt. Bundesregierung legt ab 2024 dem Bundestag einen Bericht zur THG-Quote vor (Technologien, Kosten, Verfügbarkeit).								
	© BMU Stand: 22.09.2021								

Quelle: Graphik nach (BMU 2021)

B.2 Biomasse und Emissionsfaktoren

Der Biomasse bis 2021 wurde anhand der BLE (BLE Referat 523 2022)⁹-Daten aktualisiert. Das Szenario bis 2050 wurde angepasst, um den höchsten Anteil an Biokraftstoffmix 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 Biomasse und den spezifischen Emissionsfaktoren ((Fehrenbach et al. 2016) und (Prussi et al. 2020)) pro Biomasetyp errechnet. Im Trendszenario wird dabei eine jährliche Veränderung des durchschnittlichen Biomasse 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 101 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. Einen gewissen Beitrag zu dieser Quote wird dagegen mit hoher Wahrscheinlichkeit Biomethan einbringen, da hier wie bei Bioethanol aus Lignozellulose Produktionsanlagen in Betrieb sind oder in Kürze in Betrieb gehen. Biomethan wird aufgrund des niedrigen Anteils an Gasfahrzeugen jedoch 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. Da der Anteil an Ethanol in der Beimischung jedoch technisch und rechtlich begrenzt ist, reduziert sich, wie in Tabelle 101 zu sehen, der Anteil des Bioethanols aus Nahrungs- und Futterpflanzen bis 2030 drastisch (zu den Beimischungsgrenzen siehe auch nächstes Kapitel),

Tabelle 101: Biomasse (Anteile gerundet) der Biokraftstoffe im Trendszenario

Kraftstoff	Kategorie	Biomasetyp	2019	2020	2030
Ethanol	Biomasse aus Nahrungs- und Futterpflanzen	Mais, Weizen, Zuckerrohr, Zuckerrübe, andere Getreide	94 %	78 %	0 %
	fortschrittlichen Biokraftstoffen	Ligno-Zellulose (advanced)	6%	22 %	100 %
Biodiesel/ HVO	Biomasse aus Nahrungs- und Futterpflanzen	FAME (Raps-, Soja-, Sonnenblumen- und Palmöl)	66%	58 %	60 %
	Altspeiseöl und tierische Fette	Altöl/Tierfette	34 %	42 %	40 %
Biogas	Biomasse aus Nahrungs- und Futterpflanzen	Silomais	18 %	7 %	0 %
	fortschrittlichen Biokraftstoffen	Gülle/Mist	0 %	28 %	70 %
	fortschrittlichen Biokraftstoffen	Bioabfall (advanced)	82 %	65 %	0%

Quelle (BLE Referat 523 2021) ; Szenario: Annahmen ifeu

⁹ Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung

Unter diesen Annahmen kann der Mindestanteil von 2,6 % fortschrittlichen Biokraftstoffen erreicht werden. In dem Szenario wird ebenfalls die Obergrenze für Altspeiseöl und tierische Fette von 1,9 % am Endenergieverbrauch gemäß der THG Quote ausgeschöpft. Zwischen den angegebenen Stützjahren werden die Anteile linear interpoliert, nach 2030 bleiben die Anteile konstant.

Tabelle 102 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 NaBiSy¹⁰. Dabei wurden die Werte von BioEm als plausible Ausgangslage für die Basis 2019 identifiziert. Die deutlich niedriger liegenden Emissionswerte der BLE konnten hingegen nicht nachvollzogen werden und werden daher bisher nicht für 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 Biomasse-Mix 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 werden¹¹. Bei Biodiesel sind die Reduktionspotenziale deutlich geringer, da das Potenzial von abfallbasiertem Biodiesel bereits nahezu ausgeschöpft ist. Aufgrund des Phase-out von Palmöl und des erwarteten Phase-out von Sojaöl¹² wird Biodiesel ansonsten v.a. auf Rapsölbasis erzeugt werden. Der Anteil an HVO wird nach der Abschaffung von Palmöl aus Abfall produziert. Nach 2030 bleiben die THG-Emissionsfaktoren konstant.

Tabelle 102: THG-Emissionsfaktoren (g CO₂eq/MJ) der Biokraftstoffe und Biomasse im Trendszenario

Kraftstoff und Biomasse	2022	2025	2030
Ethanol	25	19	5
Abfall (z. B. Ligno-Zellulose)	8	5	5
Mais	28	25	25
Andere Getreide	28	25	25
Weizen	28	25	25
Zuckerrohr	8	5	5
Zuckerrübe	28	25	25

¹⁰ die staatliche Web-Anwendung Nachhaltige - Biomasse - Systeme

¹¹ 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.

¹² Auch bei Sojaöl bestehen Risiken durch indirekte Landnutzungsänderungen (ILUC), wodurch dieses seine Anrechnungsfähigkeit verlieren könnte

Kraftstoff und Biomasse	2022	2025	2030
Biodiesel	32	29	27
Abfall (UCO)	10	10	10
Palmöl	41	abgeschafft	abgeschafft
Raps	43	40	35
Soja	39	abgeschafft	abgeschafft
Sonnenblumen	38	35	35
HVO Palmöl	36	abgeschafft	abgeschafft
HVO Abfall	34	34	34
Biomethan	20	15	10
Abfall	18	15	10
Silomais	28	25	20
Gülle	15	13	10

Quelle: BioEM und RED II Typical und eigene Annahmen. Anmerkung: THG-Vorketten Emissionen

B.3 Anteile der Biokraftstoffe und synthetischen Kraftstoffe am Endenergieverbrauch

Der energetische Anteil des Endenergieverbrauchs von Biodiesel an Diesel im Jahr 2022 beträgt 6,9% und von Ethanol an Benzin 4,5 % (siehe Tabelle 103). 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)¹³ 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. Diese sind B20, B30, B100 für Diesel/Biodiesel und E85 für Benzin/Ethanol. Es wird jedoch angenommen, dass diese aktuell in Deutschland nur einen geringen Anteil am Endenergieverbrauch im Verkehr ausmachen. Daraus werden folgenden Annahmen für den maximal möglichen Biokraftstoffanteil getroffen:

- ▶ Benzin: Energetisch bis zu 7,3 % bzw. volumetrisch bis zu 10,6 % Ethanol
- ▶ Diesel: Energetisch bis zu 8,1 % bzw. volumetrisch bis zu 8,8 % Biodiesel

Für Erdgasfahrzeuge besteht keine Beimischungsgrenze von Biomethan. Der energetische Anteil von Biomethan an CNG bleibt ab 2021 daher durchgehend zwischen 95% und 99 %, um die für die Quotenerfüllung erforderliche Gesamtmenge an Biokraftstoffen im Verkehr zu gewährleisten (siehe Tabelle 103).

Tabelle 103: Anteile Biokraftstoffe und PtX im Trendszenario

Energieträger	2025	2030	2050
Biodiesel an Diesel (energetisch)	7,3 %	8,1 %	8,1 %

¹³ Volumenkonzentration (zwei Volumen aufeinander bezogen)

Energieträger	2025	2030	2050
Bioethanol an Benzin (energetisch)	5,6 %	7,3%	7,3%
Biomethan an CNG (energetisch)	95,4 %	99,7%	99,7%
PtX in Fluggasturbinenkraftstoff*	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 104). Nach 2030 bleiben alle prozentualen Anteile konstant.

Tabelle 104: Anteil der Biomassenmixkategorien nach THG Quote des TREMOD Trendszenarios

Kraftstoff	2021 (real)	2022	2025	2030
Biomasse aus Nahrungs- und Futterpflanzen	4,4 %	4,4%	4,1 %	2,8 %
Altspeiseöl und tierische Fette	1,4 %	1,4%	1,9 %	1,9 %
fortschrittlichen Biokraftstoffen	0,2%	0,2%	0,8 %	2,6 %

Quellen: Eigene Annahmen

B.4 Erfüllung der Vorschriften

Erfüllung der überarbeitenden und weiterentwickelnden der in 2021 überarbeitete THG Quote

Die Biokraftstoffe müssen seit dem 6.10.2015 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 sollen die Anforderungen an die Minderung der Treibhausgasemissionen erhöht werden: Anlagen, die ab 2021 in Betrieb genommen werden, müssen ein THG-Einsparpotenzial von mindestens 65% nachweisen können¹⁴.

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, angerechnet werden (bezeichnet als UER).

Infolge des BImSchG §37a(4)), erweitert durch die 38. BImSchV berechnet sich der Referenzwert, gegenüber dem die Treibhausgasminderung 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 Biokraftstoffs. Der Basiswert beträgt 94,1 kg CO_{2e}/GJ (WTW Kilogramm Kohlenstoffdioxid-Äquivalent pro Gigajoule). Treibhausgasemissionen des elektrischen Stroms werden

¹⁴ 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,

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.

Tabelle 105 stellt die Ergebnisse zur Quotenerfüllungen des TREMOD Szenarios ab dem Verpflichtungsjahr 2022 dar. In den Jahren 2022, sowie 2025 ist die THG Quote erst erfüllt, wenn die UER Emissionsminderungen von -1,2% angerechnet werden. Da diese Anrechnung erst bis 2025 erlaubt ist, wird die THG Quote 2030 nicht erreicht.

Wenn die BLE Emissionsfaktoren, anstatt der Bio EM und RED II „typical value“ eingesetzt werden, wird leider die THG Quote ohne UER nicht erfüllt. Darüber hinaus lassen sich bei den BLE Emissionsfaktoren Emissionsminderungen anrechnen, welche mit den Grundlagen von BioEM und den RED II Standardwerten (typical values) nicht nachvollziehbar sind. Mögliche Unterschiede könnten daher im Rahmen weiterer Forschungsvorhaben untersucht werden.

Die durch Biokraftstoffe durchschnittlich erzielte THG-Minderung steigt von 74% in 2022 bis 82% in 2030 aber die THG Minderung von Biokraftstoffen erreicht maximal eine Minderung von 5,8% in 2030. Dagegen spielt der Anteil von Strom an der Minderung mit 15,7% der THG Reduktion eine sehr große Rolle in 2030, unter anderem dank der im Gesetz geplanten Anrechnungsfaktoren. Zur Erfüllung der Ziele ist dementsprechend der stärkste Hebel der Stromemissionsfaktor¹⁵: wird 2030 ein Stromemissionsfaktor von 78 gCO₂/MJ, im Vergleich mit den im Szenario angesetzten 108 gCO₂/MJ verwendet, erreicht Deutschland sein THG Minderungsziel.

Tabelle 105: Beispielrechnungen Erfüllung der THG-Quote im TREMOD-Trendszenario

Wert	2022	2025	2030
Biokraftstoffanteil gesamt (MJ/MJ)	5,7%	6,8%	7,2%
Mittlere THG-Minderung Biokraftstoffe gegenüber fossilem Basiswert (94,1 gCO ₂ eq/MJ)	-74%	-78%	-82%
THG-Reduktion durch Biokraftstoffe	-3,9%	-4,9%	-5,8%
THG-Reduktion durch Upstream, Strom, LPG, CNG	-2%	-4,4%	-15,7%
THG-Reduktion insgesamt ohne UER	-5,9%	-9,3%	-21,4%
THG-Reduktion insgesamt mit UER	-7,1%	-10,5%	UER nicht mehr anrechenbar
THG Minderungsziel	-7%	-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 und THG Quote

¹⁵ Laut THG Minderungsverordnung §5(3) „der Wert der durchschnittlichen Treibhausgasemissionen pro Energieeinheit des Stroms in Deutschland wird von der nach §20 Absatz 1 zuständigen Stelle jährlich auf Basis geeigneter internationaler Normen ermittelt und bis zum Ablauf des 31. Oktober für das darauffolgende Verpflichtungsjahr im Bundesanzeiger bekannt gegeben“. Die Verzögerung beträgt entsprechend ca. 2 Jahre. Deswegen wird der Strom EF des Vor-vorjahres im TREMOD Szenario für die Berechnung der Einhaltung der THG Quote eingesetzt.