

TEXTE

89/2024

Datenbericht

Lokaler, nationaler und internationaler umweltschonender Güterverkehr – Datenbericht zum Transformationsdialog und UBA Forum mobil und nachhaltig

von:

Kirsten Biemann, Felix Spathelf, Christoph Heidt, Viviann Bolte, Horst Fehrenbach, ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH

Daniela Kirsch, Arnd Bernsmann, Andreas Gade, Konstantin Horstmann, Sebastian Stütz, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 89/2024

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

Forschungskennzahl 3722 57 104 0
FB001490

Datenbericht

Lokaler, nationaler und internationaler umweltschonender Güterverkehr – Datenbericht zum Transformationsdialog und UBA Forum mobil und nachhaltig

von

Kirsten Biemann, Felix Spathelf, Christoph Heidt, Vivianne
Bolte, Horst Fehrenbach, ifeu - Institut für Energie- und
Umweltforschung Heidelberg gGmbH

Daniela Kirsch, Arnd Bernsmann, Andreas Gade,
Konstantin Horstmann, Sebastian Stütz, Fraunhofer-
Institut für Materialfluss und Logistik IML

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
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:

Juni 2024

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2 „Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr“
Andrea Fechter, Dr. Martin Lange
Fachgebiet I 2.1 „Umwelt und Verkehr“
Martyn Douglas

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2024

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

Kurzbeschreibung: Lokaler, nationaler und internationaler umweltschonender Güterverkehr – Datenbericht zum Transformationsdialog und UBA Forum mobil und nachhaltig

Der Güterverkehr spielt eine zentrale Rolle bei der Versorgung von Gesellschaft und Wirtschaft, jedoch gehen mit ihm auch negative Wirkungen auf Mensch und Natur einher. Der vorliegende Bericht beschreibt die Umweltwirkungen des Güterverkehrs. Zuerst werden die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen des nationalen Straßen- und Schienengüterverkehrs, der nationalen Binnenschifffahrt sowie des internationalen See- und Luftfrachtverkehrs dargestellt. Hierbei werden direkte Verbrennungsemissionen, Emissionen der Energiebereitstellung, die zusätzliche Klimawirkung des Flugverkehrs in großen Höhen sowie Emissionen aus Fahrzeugherstellung, Infrastruktur und Lagerbetrieb berücksichtigt. Damit gehen die Analysen deutlich über die nach dem Klimaschutzgesetz im Verkehrssektor auszuweisenden Emissionen hinaus. Neben den Daten für das Bezugsjahr 2019 wird ein Trendszenario bis zum Jahr 2050 gezeigt. Daran anschließend analysiert der Bericht die Umweltwirkungen der urbanen Logistik genauer. Dabei werden die Segmente Kurier-, Express-, und Paketdienste (KEP), Stückgut, Gastronomie, Lebensmittel, Handwerk, Abfalllogistik und sonstige Dienstleistungen jeweils für sich betrachtet. Untersuchungen der Flächenbelegung und der Trennwirkung durch Verkehrsinfrastruktur schließen den Bericht ab.

Abstract: Local, national and international environmentally friendly goods transport – data report for the UBA Forum 2024 conference

Freight transport plays a central role in supplying the society and the economy- but it comes with negative environmental impacts on people and nature. This report describes the environmental impact of freight transport. First, the greenhouse gas and air pollutant emissions of national road, rail and inland waterway freight transport as well as international sea and air freight transport are presented. Direct combustion emissions, emissions from energy supply, the additional climate impact of air transport at high altitudes and emissions from vehicle production, infrastructure and logistics facilities are considered. Therefore, the analysis goes well beyond the emissions to be reported in the transport sector in accordance with the German Climate Protection Act (Klimaschutzgesetz). In addition to data for the reference year 2019, a trend scenario up to the year 2050 is shown. The report then analyses the environmental impact of urban logistics in more detail. The courier, express and parcel services, groupage/ general cargo, catering, food, craft, waste logistics and other service segments are each considered separately. The report concludes with an analysis of the impact of transport infrastructure on land occupation as well as its separating effect.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	12
Abkürzungsverzeichnis.....	14
Zusammenfassung.....	17
Summary.....	25
1 Emissionen des nationalen und internationalen Güterverkehrs.....	33
1.1 Methodischer Rahmen.....	33
1.1.1 Betrachtete Emissionen.....	33
1.1.2 Modell TREMOD und das TREMOD-Trendszenario.....	34
1.1.3 Verkehrsleistungen des Güterverkehrs in Deutschland.....	35
1.2 Straßengüterverkehr.....	36
1.2.1 Verkehrsmengen und Fahrzeugflotten.....	36
1.2.2 THG-Emissionen.....	40
1.2.3 Luftschadstoffe.....	41
1.2.4 Sonstige Emissionen.....	43
1.3 Schienengüterverkehr.....	44
1.3.1 Verkehrsmengen und Flottenmix.....	44
1.3.2 THG-Emissionen.....	44
1.3.3 Luftschadstoffe.....	45
1.3.4 Sonstige Emissionen.....	46
1.4 Binnenschifffahrt.....	47
1.4.1 Verkehrsmengen und Flottenzusammensetzung.....	47
1.4.2 THG-Emissionen.....	48
1.4.3 Luftschadstoffe.....	48
1.4.4 Sonstige Emissionen.....	49
1.5 Seeverkehr.....	49
1.5.1 Güteraufkommen und Verkehrsleistung.....	49
1.5.2 THG-Emissionen.....	51
1.5.3 Luftschadstoffe.....	52
1.5.4 Sonstige Emissionen.....	53
1.6 Luftfrachtverkehr.....	54
1.6.1 Güteraufkommen und Verkehrsleistung.....	54
1.6.2 THG-Emissionen und Klimawirkung.....	56

1.6.3	Luftschadstoffe	60
1.6.4	Sonstige Emissionen	60
1.7	THG-Emissionen des Güterverkehrs im Lebenszyklus	61
1.7.1	Vergleich der spezifischen THG-Emissionen	61
1.7.2	Emissionen durch Lager/Logistikimmobilien	63
1.7.3	THG-Emissionen des Güterverkehrs insgesamt.....	64
2	Verkehrsmengen und Umweltwirkungen urbane Logistik.....	66
2.1	Methodischer Rahmen.....	66
2.1.1	Abgrenzung Urbaner Raum	66
2.1.2	Betrachtete Segmente	67
2.1.3	Vorgehen und betrachtete Umweltwirkungen.....	69
2.2	Kurier-, Express- und Paket (KEP).....	69
2.2.1	Abgrenzung Marktsegment	69
2.2.2	Fahr- und Verkehrsleistung.....	70
2.2.3	THG-Emissionen.....	72
2.2.4	Luftschadstoffe	73
2.2.5	Umweltwirkungen	73
2.3	Stückgut	74
2.3.1	Abgrenzung Marktsegment	74
2.3.2	Fahr- und Verkehrsleistung.....	74
2.3.3	THG-Emissionen.....	76
2.3.4	Luftschadstoffe	77
2.3.5	Umweltwirkungen	77
2.4	Gastronomie	78
2.4.1	Abgrenzung Marktsegment	78
2.4.2	Fahr- und Verkehrsleistung.....	78
2.4.3	THG-Emissionen.....	82
2.4.4	Luftschadstoffe	83
2.4.5	Umweltwirkungen	83
2.5	Lebensmittel	84
2.5.1	Abgrenzung Marktsegment	84
2.5.2	Fahr- und Verkehrsleistung.....	85
2.6	Handwerk.....	86
2.6.1	Abgrenzung Marktsegment	86

2.6.2	Fahr- und Verkehrsleistung.....	86
2.6.3	THG-Emissionen.....	88
2.6.4	Luftschadstoffe	89
2.6.5	Umweltwirkungen	89
2.7	Abfalllogistik.....	90
2.7.1	Abgrenzung Marktsegment	90
2.7.2	Fahr- und Verkehrsleistung.....	90
2.7.3	THG-Emissionen.....	94
2.7.4	Luftschadstoffe	95
2.7.5	Umweltwirkungen	95
2.7.6	Methodische Hinweise	96
3	Flächenbelegung und Trennwirkung durch Verkehr.....	97
3.1	Methode zur Flächeninanspruchnahme und dazugehörige Umweltwirkungen je Verkehrsart bzw. Verkehrsträger.....	97
3.2	Konzepte zur Bewertung der Trennwirkung und Zerschneidung.....	98
3.2.1	Definition von Barriere- und Trennwirkung.....	98
3.2.2	Methoden zur Wirkungsabschätzung von Verkehrsinfrastruktur	99
3.2.3	Vorschlag zur Einbeziehung von Trennwirkung.....	102
3.3	Beispielhafte Anwendung des Vorschlags	103
3.3.1	Flächendaten der einzelnen Verkehrsarten	103
3.3.2	Potentielle Auswirkungen der Flächenbelegung und Trennwirkung durch Verkehrsarten	104
A	Anhang: Daten und Methoden zur Berechnung der Umweltwirkungen	108
A.1	Seeschifffahrt.....	108
A.1.1	Vorwort.....	108
A.1.2	Erläuterung der Datenquellen	108
A.1.3	Bilanzgrenzen.....	109
A.1.4	Güteraufkommen	109
A.1.5	Bestimmung der zurückgelegten Distanzen	109
A.1.6	Emissionsfaktoren.....	110
A.1.7	Prognose für das Jahr 2050.....	111
A.2	Luftverkehr.....	111
A.2.1	Vorwort.....	111
A.2.2	Bilanzgrenzen.....	111
A.2.3	Zuschätzung für Strecken nach der ersten (Zwischen-)Landung.....	112

A.3	THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung und Infrastruktur	113
A.4	Methoden zur Allokation von Fläche	113
A.5	Emissionsfaktoren urbane Logistik	114
4	Quellenverzeichnis	117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung der Verkehrsleistungen des Güterverkehrs in Deutschland von 1991 bis 2019 sowie laut gleitender Langfristprognose bis 2050	18
Abbildung 2:	Klimawirkung des deutschen Güterverkehrs 2019 nach Klimaschutzgesetz (KSG) und unter Berücksichtigung weiterer Effekte.....	20
Abbildung 3:	Urbane Räume nach RegioStaR.....	21
Abbildung 4:	Verkehrsleistungen der betrachteten Segmente	24
Abbildung 5:	Entwicklung der Verkehrsleistungen des Güterverkehrs in Deutschland von 1991 bis 2019 sowie laut gleitender Langfristprognose bis 2050	35
Abbildung 6:	Relative Entwicklung der Verkehrs- und Fahrleistungen im Straßengüterverkehr (LNF+SNF) in Deutschland bis 2021 und im Trendszenario bis 2050 gegenüber 1995	37
Abbildung 7:	Anteil der Fahrleistungen im Straßengüterverkehr in Deutschland nach verschiedenen Merkmalen im Jahr 2019 ...	38
Abbildung 8:	Entwicklung des Bestands an rein elektrischen Lkw vom 1.1.2019 bis zum 1.1.2023 in Deutschland.....	39
Abbildung 9:	Fahrleistungen im Straßengüterverkehr nach Antrieb und Fahrzeugtyp 2019 und 2050 (lt. Trendszenario)	40
Abbildung 10:	THG-Emissionen des Straßengüterverkehrs von 2019 bis 2050 im Trendszenario tank-to-wheel und well-to-wheel.....	41
Abbildung 11:	Direkte Stickoxid-Emissionen des Straßengüterverkehrs in Deutschland 2019 und 2050.....	42
Abbildung 12:	Direkte (Auspuff-)Partikel-Emissionen des Straßengüterverkehrs in Deutschland 2019 und 2050	43
Abbildung 13:	Verkehrsleistungen des Schienengüterverkehrs von 2019 bis 2050 im Trendszenario	44
Abbildung 14:	Treibhausgasemissionen des Schienengüterverkehrs von 2019 bis 2050 im Trendszenario (TTW).....	45
Abbildung 15:	Luftschadstoffemissionen des Schienengüterverkehrs mit Dieseltraktion 2019 bis 2050 im Trendszenario im Vergleich zum Basisjahr 1990.....	46
Abbildung 16:	Güteraufkommen und Verkehrsleistung des Seeschiffsverkehrs nach Ursprungs-/Zielkontinent im Jahr 2019 (deutsche Im- und Exporte)	50
Abbildung 17:	Aufteilung der THG-Emissionen (WTW) der Seeschifffahrt nach Aus- und Einfuhr sowie Ziel- bzw. Ursprungskontinenten im Jahr 2019	52

Abbildung 18:	Entwicklung der Verkehrsleistung des von deutschen Flughäfen abgehenden Luftfrachtverkehrs bis 2022 und im Trendszenario bis 2050	54
Abbildung 19:	Güteraufkommen und Verkehrsleistung des von deutschen Flughäfen abgehenden Luftfrachtverkehrs nach Zielkontinent im Jahr 2019	55
Abbildung 20:	Aufteilung der Verkehrsleistung im Luftfrachtverkehr nach Distanzklasse bzw. Flugzeugtyp im Jahr 2019	56
Abbildung 21:	Entwicklung der jährlichen Klimawirkung (WTW THG-Emissionen und zusätzliche Klimawirkung in großen Höhen) des von deutschen Flughäfen abgehenden Luftfrachtverkehrs bis 2022 und im Trendszenario bis 2050.....	57
Abbildung 22:	Entwicklung der Klimawirkung pro Tonnenkilometer (THG-Emissionen WTW und zusätzliche Klimawirkung in großen Höhen) des von deutschen Flughäfen abgehenden Luftfrachtverkehrs bis 2022 und im Trendszenario bis 2050 ...	58
Abbildung 23:	Klimawirkung des von deutschen Flughäfen abgehenden Luftfrachtverkehrs im Jahr 2019	59
Abbildung 24:	Klimawirkung des von Deutschland ausgehenden Luftfrachtverkehrs im Jahr 2019 inkl. Zuschätzung für Streckenabschnitte nach der 1. Landung	60
Abbildung 25:	Durchschnittliche Klimawirkung des Güterverkehrs in Deutschland im Jahr 2017 im Lebenszyklus (g CO _{2e} /tkm WtW sowie Fahrzeug-/Infrastrukturbereitstellung).....	62
Abbildung 26:	Treibhauspotenziale von leichten Nutzfahrzeugen nach Antriebsart im Lebenszyklus.....	63
Abbildung 27:	THG-Emissionen des deutschen Güterverkehrs 2019 nach Klimaschutzgesetz (KSG) und unter Berücksichtigung weiterer Klimawirkungen.....	65
Abbildung 28:	Regionalstatistische Raumtypologie für die Mobilitäts- und Verkehrsforschung	66
Abbildung 29:	Urbane Räume nach RegioStaR.....	67
Abbildung 30:	Segmente des städtischen Güterverkehrs in Anlehnung an Agora Verkehrswende	68
Abbildung 31:	Prognose der Umsätze für Onlinebestellungen in Deutschland	84
Abbildung 32:	Abfallaufkommen in Deutschland (einschließlich gefährlicher Abfälle)	91
Abbildung 33:	Durchschnittliche Abfallmengen pro Gebietsanfahrt	92
Abbildung 34:	Anteil jährlicher Tonnenkilometer im urbanen Gebiet im Marktsegment Abfalllogistik (Holsystem)	94
Abbildung 35:	Flächenbelegung und Trennwirkung der Verkehrsarten Flug- und Bahnverkehr.	105

Abbildung 36:	Flächenbelegung und Trennwirkung der Verkehrsart Straßenverkehr mit reiner Flächenbelegung (links), Flächenbelegung und Trennwirkung ohne Gemeindestraßen und sonstige Straßen (mittig, best case) und mit Gemeinde- und sonstigen Straßen (rechts, worst case).	106
Abbildung 37:	Flächenbelegung der Verkehrsart „Straßenverkehr“ und der Logistikimmobilien ohne Trennwirkung.	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Treibhausgasemissionen (Mio. t CO _{2e}) des Güterverkehrs in Deutschland 1990-2019.	33
Tabelle 2:	Tragfähigkeit und Ladung der Binnenschiffe.	47
Tabelle 3:	THG-Emissionen der Binnenschifffahrt in Deutschland nach KSG-Abgrenzung (tank-to-wheel) im Jahr 2019 und im Trendszenario bis 2050.	48
Tabelle 4:	NO _x - und Partikelemissionen der Binnenschifffahrt in Deutschland (tank-to-wheel) im Jahr 2019 und im Trendszenario bis 2050.	49
Tabelle 5:	Auf Deutschland entfallende THG-Emissionen der Seeschifffahrt (in Mio. t CO _{2e})	51
Tabelle 6:	Auf Deutschland entfallende Luftschadstoffemissionen der Seeschifffahrt im Jahr 2019 (in Kilotonnen)	53
Tabelle 7:	Luftschadstoffemissionen des von deutschen Flughäfen abgehenden Luftfrachtverkehrs in den Jahren 2019 und 2050 (TTW, in Tonnen)	60
Tabelle 8:	Deutschlandweite Fläche und THG-Emissionen von Lagergebäuden für den Güterverkehr im Jahr 2019 und 2030 nach Analysen des PULK-Projekts	64
Tabelle 9:	Kennzahlen B2B und B2C im Marktsegment KEP.	71
Tabelle 10:	Fahr- und Verkehrsleistung im Marktsegment KEP	72
Tabelle 11:	THG-Emissionen (WTW) für das Marktsegment KEP (gerundet)	73
Tabelle 12:	Luftschadstoffe (TTW) für das Marktsegment KEP	73
Tabelle 13:	Kennzahlen im Marktsegment Stückgut	75
Tabelle 14:	Fahr- und Verkehrsleistung im Marktsegment Stückgut	76
Tabelle 15:	THG-Emissionen (WTW) für das Marktsegment Stückgut (gerundet)	77
Tabelle 16:	Luftschadstoffe (TTW) für das Marktsegment Stückgut	77
Tabelle 17:	Mengenaufkommen, Fahr- und Verkehrsleistung im Marktsegment Gastronomie	82
Tabelle 18:	THG-Emissionen (WTW) für das Marktsegment Gastronomie (gerundet)	82

Tabelle 19:	Luftschadstoffe (TTW) für das Marktsegment Gastronomie ...	83
Tabelle 20:	Kennzahlen im Marktsegment Handwerk.....	87
Tabelle 21:	Fahr- und Verkehrsleistung im Marktsegment Handwerk.....	88
Tabelle 22:	THG-Emissionen (WTW) für das Marktsegment Handwerk (gerundet).....	89
Tabelle 23:	Luftschadstoffe (TTW) für das Marktsegment Handwerk.....	89
Tabelle 24:	THG-Emissionen (WTW) für das Marktsegment Abfalllogistik (gerundet).....	95
Tabelle 25:	Luftschadstoffe (TTW) für das Marktsegment Abfalllogistik....	95
Tabelle 26:	Beschreibung der Hemerobie-Klassen nach Giegrich und Sturm (1999).	98
Tabelle 27:	Übersicht Elemente der Kategorie A mit Pufferabstand (BfN und BMUV 2023).	101
Tabelle 28:	Teilaggregierte Flächenbelegung durch die Infrastruktur für die einzelnen Verkehrsarten nach (Allekotte et al. 2020).....	104
Tabelle 29:	Abschätzung der THG-Emissionen für die Fahrzeugherstellung und Verkehrsinfrastruktur des deutschen Güterverkehrs (Verkehrsleistung 2019)	113
Tabelle 30:	Vergleich der Allokationsmethoden von Fläche auf Verkehrsträger.....	114
Tabelle 31:	Verwendete Emissionsfaktoren für Fahrzeuge der urbanen Logistik.....	114

Abkürzungsverzeichnis

aF-Äq.	artifizielle Flächenäquivalente
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AR5	Fünfter Sachstandsbericht des IPCC
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
BAB	Bundesautobahn
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BEV	batterieelektrisches Fahrzeug (engl.: battery electric vehicle)
BfN	Bundesamt für Naturschutz
Bio.	Billion
BiSchi	Binnenschiff
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland
C2C	Consumer-to-Consumer
CH₄	Methan
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CO_{2e}	CO ₂ -Äquivalente
DB AG	Deutsche Bahn AG
Destatis	Statistisches Bundesamt
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (engl.: fuel cell electric vehicle)
FTL	Full-Truck-Load
Fzkm	Fahrzeugkilometer
GLP	gleitende Langfristprognose
GWP 100	Treibhausgaspotential, bezogen auf 100 Jahre (engl.: global warming potential)

IPCC	Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (engl.: Intergovernmental Panel on Climate Change)
ISO	Internationale Organisation für Normung
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KEP	Kurier, Express und Paket
KiD	Kraftverkehr in Deutschland
KSG	Klimaschutzgesetz
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	leichtes Nutzfahrzeug
LNG	Flüssigerdgas (engl.: liquefied natural gas)
LTO	Start und Landung (engl.: landing and take off)
LZ/SZ	Lastzug/Sattelzug
Mg	Megagramm
Mio.	Million
MMS	Mit-Maßnahmen-Szenario
MoPro	Molkereiprodukte
Mrd.	Milliarde
N1-III	leichtes Nutzfahrzeug mit zGG > 1760 kg
N1	Nutzfahrzeug mit bis zu 3,5 t zGG
N2	Nutzfahrzeug mit 3,5 t bis 12 t zGG
N3	Nutzfahrzeug mit mehr als 12 t zGG
N₂O	Lachgas
NEC	nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe (engl.: national emission ceilings)
NIR	nationaler Inventarbericht (engl.: national inventory report)
NMHC	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (engl.: non-methane hydrocarbons)
NO₂	Stickstoffdioxid
NO_x	Stickstoffoxide

NST-2007	einheitliches Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik, Version 2007 (franz.: nomenclature uniforme des marchandises pour les statistiques de transport)
NUTS	Nomenclature des unités territoriales statistiques
pkm	Personenkilometer
PM10	Feinstaub mit Durchmesser < 10 µm (engl.: particular matter)
PM2,5	Feinstaub mit Durchmesser < 2,5 µm (engl.: particular matter)
RegioStaR	Regionalstatistische Raumtypologie
SNF	schweres Nutzfahrzeug
SO₂	Schwefeldioxid
TF	Tragfähigkeit
THG	Treibhausgas
TK	Tiefkühlprodukte
tkm	Tonnenkilometer
TREMOD	Transport Emission Model
TREMOD-AV	Transport Emission Model - Aviation
TTW	tank-to-wheel
UBA	Umweltbundesamt
UFR	unzerschnittener Funktionsraum
USD	US-Dollar
UZVR	unzerschnittener verkehrsarmer Raum
ViZ	Verkehr in Zahlen
WHO	Weltgesundheitsorganisation (engl.: world health organization)
WTW	well-to-wheel
ZEV	Nullemissionsfahrzeug (engl.: zero emission vehicle)
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

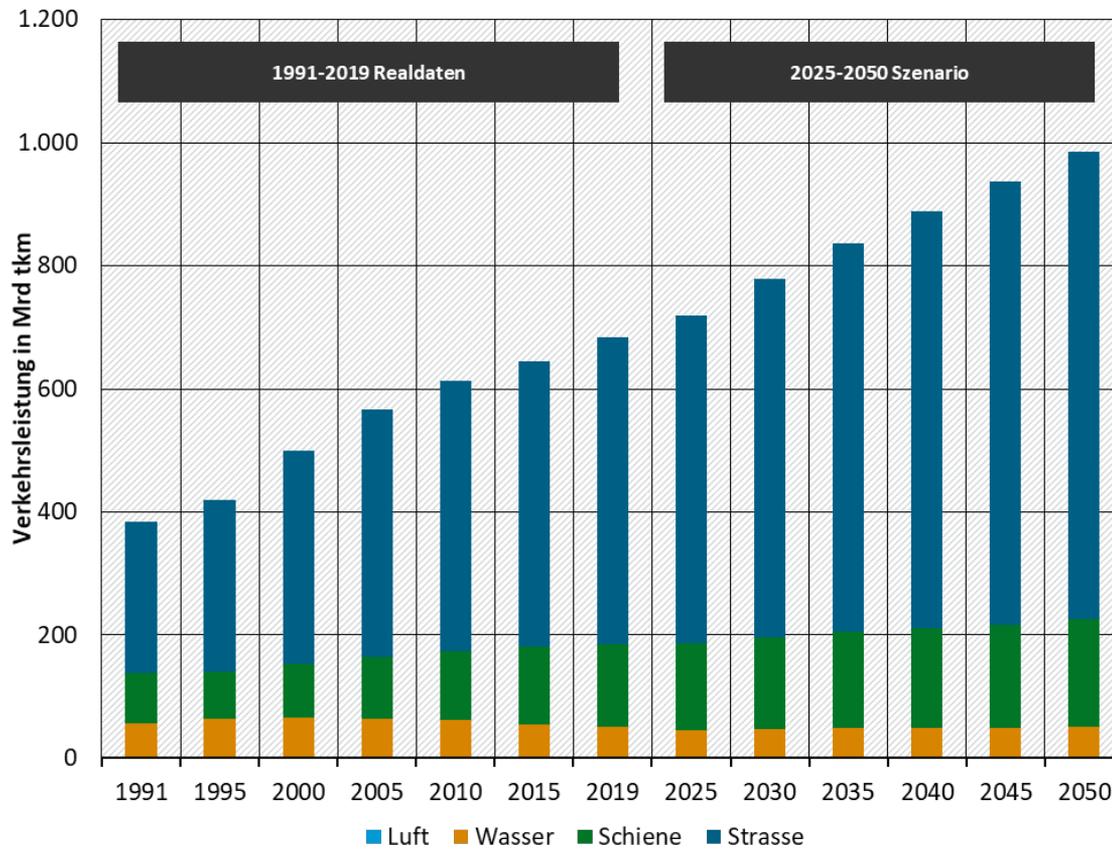
Zusammenfassung

Der Güterverkehr per Lkw, Bahn, Schiff und Flugzeug erfüllt eine zentrale Rolle für die Versorgung der Wirtschaft und der Gesellschaft sowie für den Handel mit Waren. Mit dem Güterverkehr sind jedoch auch Risiken für die Umwelt, beispielsweise durch die Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen, verbunden. Im folgenden Bericht werden Daten zur Verkehrsnachfrage und den Umweltwirkungen des Güterverkehrs analysiert. Das erste Kapitel behandelt den nationalen und internationalen Güterverkehr, das zweite Kapitel behandelt verschiedene Segmente der urbanen Logistik und im dritten Kapitel werden die Wirkungen auf die Flächenbelegung und Trennwirkung untersucht.

Nationaler und internationaler Güterverkehr

Die im folgenden dargestellte Analyse des nationalen Güterverkehrs baut auf den Daten des TREMOD-Modells (Version 6.43) auf. Seit den 1990er Jahren bis zum Jahr 2019 ist die Verkehrsleistung des Güterverkehrs in Deutschland um mehr als 70% gestiegen, wobei dieser Zuwachs vor allem auf den Straßengüterverkehr zurückgeht (Abbildung 1). Nach der gleitenden Langfristprognose des BMDV wird ein weiterer Anstieg der Verkehrsleistungen im Güterverkehr, insbesondere auf der Straße, angenommen. Bisher deckt der Güterverkehr seinen Energiebedarf fast ausschließlich aus fossilen Kraftstoffen. Im Rahmen der für das Klimaschutzgesetz zu berichtenden THG-Emissionen hatte der Güterverkehr im Jahr 2019 ca. 54 Mio. t CO_{2e} ausgestoßen und war damit für ca. 1/3 der THG-Emissionen des gesamten Verkehrssektors verantwortlich. Ca. 98% der THG-Emissionen des Güterverkehrs wurden durch den Straßengüterverkehr verursacht.

Abbildung 1: Entwicklung der Verkehrsleistungen des Güterverkehrs in Deutschland von 1991 bis 2019 sowie laut gleitender Langfristprognose bis 2050



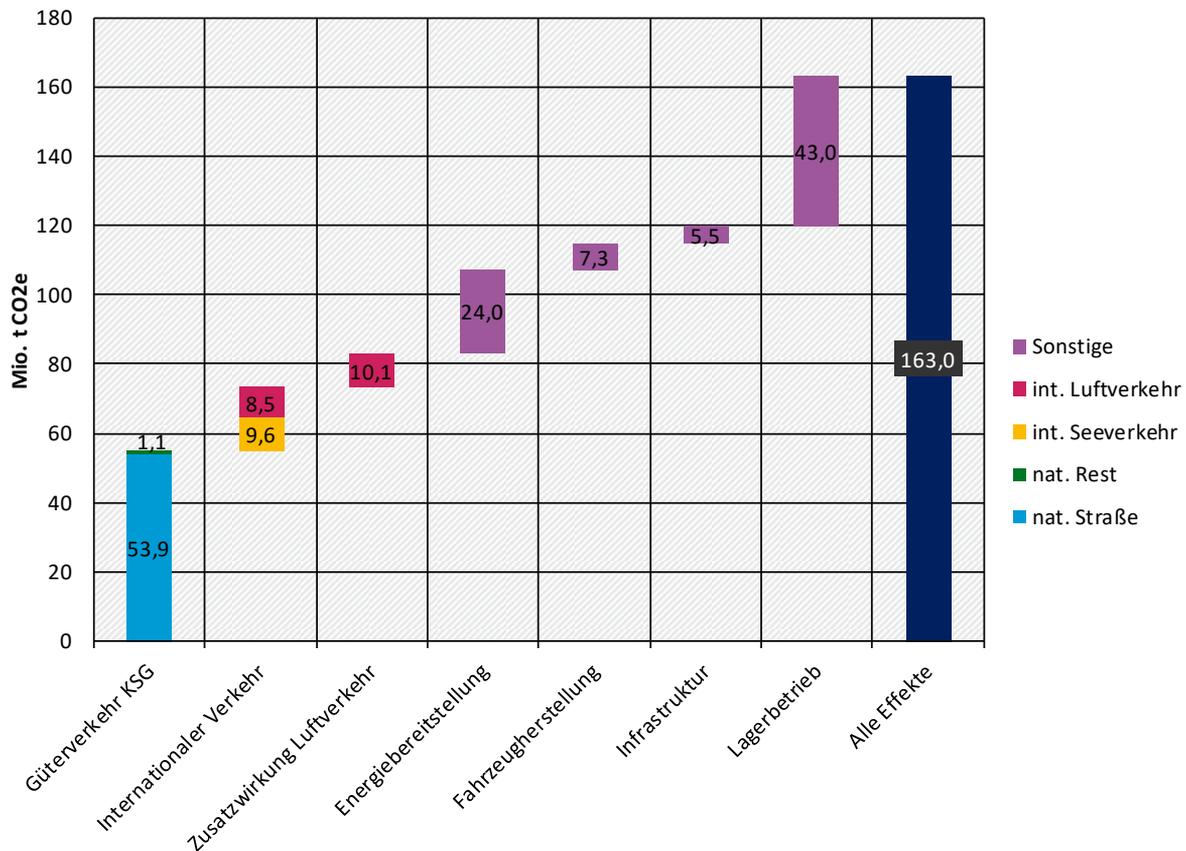
Quelle: eigene Darstellung, ifeu basierend auf TREMOD 6.43. Anmerkung: Güterverkehr ohne Rohrfernleitungen. Daten aus der gleitenden Langfristprognose lagen für 2036, 2041, 2046, 2051 vor. Die Zwischenjahre wurden von ifeu ergänzt.

Auf der Straße werden verschiedenste Güterarten transportiert, dabei machen schwere Nutzfahrzeuge mit mehr als 28 Tonnen zGG den Großteil der Verkehrsleistung aus. Mit der Bahn und mit dem Binnenschiff werden vor allem Massengüter transportiert. Aufgrund ihrer hohen Energieeffizienz und, im Falle der Bahn des hohen Anteils der Elektrotraktion, schneiden diese beiden Verkehrsmittel im Jahr 2019 bezogen auf die durchschnittlichen THG-Emissionen pro Tonnenkilometer deutlich besser ab als Lkw. Zur Luftbelastung tragen die Lkw innerhalb des Güterverkehrs deutschlandweit am meisten bei, allerdings weniger als Diesel-Pkw.

Der internationale Güterverkehr dient dem Export und Import von Waren, daher wurde auch der See- und Luftverkehr untersucht. Dafür wurden neben TREMOD auch zusätzliche Datenquellen wie die Seeverkehrsstatistik und die Außenhandelsstatistik des statistischen Bundesamtes ausgewertet. Interkontinentale Verkehre erbringen einen Großteil der Transportleistung, wobei bezogen auf das Güteraufkommen (in Tonnen) die Einfuhren deutlich überwiegen. Während die Verkehrsleistung des Seeverkehrs höher ist als die Summe des inländischen Verkehrs, ist die Verkehrsleistung des Luftgüterverkehrs sehr gering, da Transporte per Flugzeug im Vergleich zum Seeweg teuer sind. Obwohl der Luftfrachtverkehr 99 % weniger Transportleistung als der Seeverkehr erbringt, ist seine gesamte Klimawirkung ca. 60 % höher. Der etwa 160-fach höhere Emissionsfaktor des Luftverkehrs erklärt sich durch seinen hohen Energiebedarf und die zusätzliche Klimawirkung des Luftverkehrs in großen Höhen. Er hat damit die mit Abstand höchsten spezifischen THG-Emissionen pro Tonnenkilometer im Vergleich mit den anderen Güterverkehrsarten. Durch die internationalen Verkehre aus bzw. nach Deutschland erhöht sich der Treibhausgaseffekt des Güterverkehrs von 54 Mio. t CO_{2e} auf über 80 Mio. t CO_{2e} (unter Verwendung der in diesem Bericht beschriebenen Bilanzgrenzen).

Neben den direkten Emissionen aus der Verbrennung von Treibstoff verursacht der Güterverkehr Emissionen für die Energiebereitstellung, Fahrzeugherstellung, Infrastruktur und Lagerei. Hierfür wurden teilweise Daten aus dem TREMOD-Modell, sowie aus diversen UBA-Studien zusammengestellt und eine Abschätzung dieser Emissionen für den deutschen Güterverkehr im Jahr 2019 vorgenommen. Inklusive dieser Effekte betragen die THG-Emissionen mit ca. 160 Mio. t CO_{2e} ca. das 3-fache des im KSG erfassten Werts (Abbildung 2). Selbst wenn diese nicht im Verkehrssektor gemäß der Abgrenzung des KSG anrechenbar sind, können sie durch Maßnahmen beispielsweise von Speditionsunternehmen, Unternehmen im Handel oder Produktionsunternehmen reduziert werden.

Abbildung 2: Klimawirkung des deutschen Güterverkehrs 2019 nach Klimaschutzgesetz (KSG) und unter Berücksichtigung weiterer Effekte



Quelle: ifeu-Grafik. Anmerkungen: Güterverkehr KSG: Quelle TREMOD 6.43, nur direkte Emissionen (TTW) fossiler Energieträger und nach Energiebilanzprinzip; Internationaler Verkehr: Analysen in diesem Bericht, Energiebereitstellung: Quelle TREMOD 6.43 und Analysen in diesem Bericht; Fahrzeugherstellung und Infrastruktur, siehe Anhang: (Allekotte et al. 2020) und Analysen in diesem Bericht; Lagerbetrieb (betrifft nur Lager in Deutschland): UBA-Projekt PULK (2024 i.E.)

Die zukünftige Entwicklung des Güterverkehrs wurde in einem Trendszenario bis 2050 untersucht. Nach der gleitenden Langfristprognose des BMDV wird ein weiterer Anstieg der Verkehrsleistung im Güterverkehr, insbesondere auf der Straße, angenommen (vgl. Abbildung 1). Gleichzeitig wird u.a. aufgrund sinkender Batteriepreise und gesetzlichen Vorgaben zu CO₂-Flottengrenzwerten ein starker Zuwachs der Elektromobilität bei Lkw angenommen. Dennoch dürften die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 nur langsam sinken. In der Abgrenzung nach KSG würde der nationale Güterverkehr damit im Jahr 2030 noch ca. 50 Mio. t CO_{2e} ausstoßen. Dies entspricht fast 60% der zulässigen Höchstmenge von 84 Mio. t CO_{2e} für den gesamten nationalen Verkehr nach KSG. Auch die Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 ist mit den bestehenden Maßnahmen für den Güterverkehr kaum zu erreichen.

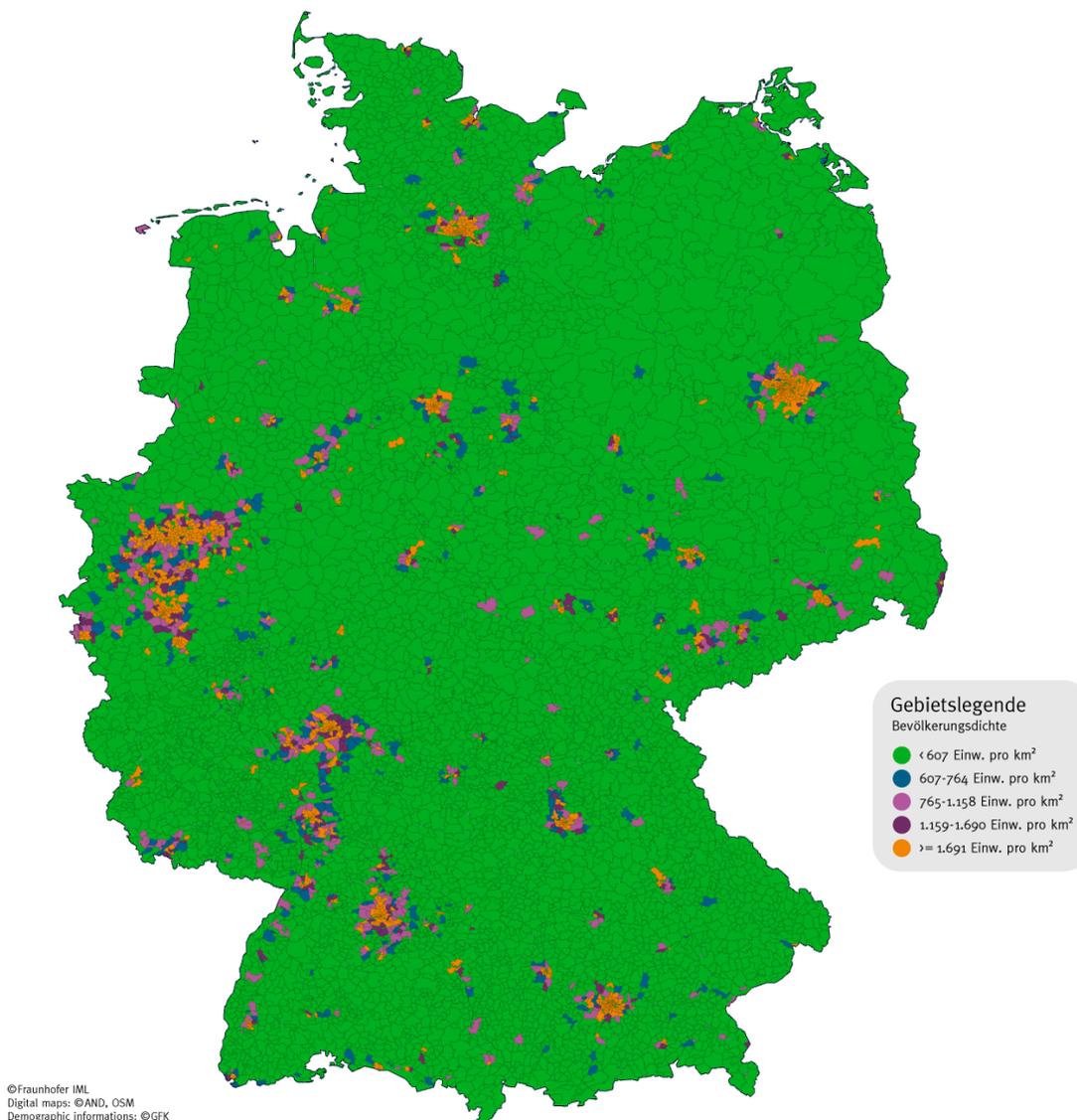
Ein stärkerer Rückgang wird bei den Luftschadstoffemissionen angenommen, da sowohl die Zunahme von Elektromobilität als auch die Umschichtung hin zu Fahrzeugen mit neueren Emissionsstandards (Euro 6/VI) aufgrund des Ausscheidens älterer Fahrzeuge aus dem Bestand Wirkung zeigen.

Verkehrsmengen und Umweltwirkungen urbane Logistik

Im urbanen Raum herrschen besondere Bedingungen für die Logistik. Die hohe Verkehrsbelastung, Einfahrtsbeschränkungen für Lkw, hohe Stoppdichte, geringe Verfügbarkeit von Be- und Entladezonen sind nur einige Aspekte, die sich auf die innerstädtischen Touren auswirken. Um Aussagen zu der Verkehrsleistung, den eingesetzten Fahrzeugen und daraus abgeleiteten Umweltwirkungen der urbanen Logistik zu treffen, wurde ein auf Einwohnerdichte bezogener Ansatz gewählt. Dieser orientiert sich, wie in der nachfolgenden Karte dargestellt, an der Einteilung der regionalstatistischen Raumtypologie (RegioStaR) des BMDV (BMDV 2021).

Für die Logistik sind bei der Planung von Tourgebieten und Touren in Deutschland nach wie vor die Postleitzahlengebiete eine wichtige Grundlage und viele Logistikkennzahlen beziehen sich auf diese geografische Unterteilung. Für die Betrachtung der urbanen Logistik wurden alle Postleitzahlengebiete ausgewählt, die über eine ausreichend hohe Einwohnerdichte (>607 EW/km²) nach den ausgewählten Raumtypen verfügen. Nach dieser Definition leben 39,5 Mio. Menschen in Deutschland im urbanen Raum. Das entspricht 47,5% der Gesamtbevölkerung.

Abbildung 3: Urbane Räume nach RegioStaR



Quelle: Fraunhofer IML (Digital maps: AND, OSM; Demographic information: GFK)

Der städtische Lieferverkehr ist ein Teil des Wirtschaftsverkehrs, welcher den Transport von Waren und Gütern in urbanen Räumen bzw. städtischen Gebieten beschreibt. Er wird in der Regel durch Lieferwagen, Lkw oder andere Fahrzeugtypen wie bspw. Kleinstfahrzeuge oder Lastenräder bedient. Zur Analyse des städtischen Lieferverkehrs liegen keine statistischen Daten zu Transportmengen und -leistungen vor, da die Abgrenzung häufig fließend zum Wirtschaftsverkehr ist und keine allgemeingültige Methodik hierzu vorliegt. Im Rahmen dieser Studie wird daher ein Ansatz entwickelt, welcher einzelne, relevante Segmente des städtischen Lieferverkehrs jeweils für sich untersucht. Dabei wurden die Fahrtzwecke in die Marktsegmente KEP, Stückgut, Gastronomie, Lebensmittel, Handwerk und Abfalllogistik unterteilt.

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus den einzelnen Segmenten dargestellt. Die verwendeten Modellansätze stellen eine Annäherung dar, um Größenordnungen der ausgewählten Marktsegmente abzuschätzen.

Kurier-, Express- und Paket (KEP)

Im urbanen Raum wurden im Jahr 2021 rund 1,2 Milliarden B2C-Pakete und 700 Millionen B2B-Pakete zugestellt. Das sind rund 4,5 Millionen Pakete pro Zustelltag. Für die Zustellung im urbanen Raum werden für den B2C-Bereich rund 28.700 Fahrzeuge am Tag eingesetzt. Im B2B-Bereich stellen 14.400 Fahrzeuge der Klasse N1 und 2.000 Fahrzeuge der Klasse N2 täglich zu.

Die Zustelltouren der KEP-Fahrzeuge finden in den hochbelasteten Verkehrszeiten statt und zeichnen sich durch viele Stopps und nur geringen Entfernungen zwischen den Stopps aus. In Summe erbringen die Zustellfahrzeuge im urbanen Raum eine Fahrleistung von über 640 Mio. km, davon werden bereits 29% mit batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen gefahren.

Bei einer Verkehrsleistung von insgesamt 334 Mio. tkm liegen die Well-to-Wheel THG-Emissionen der konventionellen Dieselfahrzeuge in Summe bei rund 161.100 Tonnen CO_{2e}. Der bereits hohe Anteil an batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen im KEP-Segment führt zu einer deutlichen Reduktion der THG-Emissionen.

Stückgut

Im Segment Stückgut wurden die Sammel- und Verteilverkehre im urbanen Raum betrachtet. Die Hauptverkehrsleistung wird hierbei in den Fahrzeugklassen N2 (70% Sendungsanteil) und N3 (27,5% Sendungsanteil) erbracht.

Bei einer typischen Tourlänge von 200 km und einer Stoppanzahl zwischen 10 und 13 ergibt sich auf Basis von 120 Mio. Sendungen in Deutschland pro Jahr – davon rd. 57 Mio. im urbanen Raum - eine Fahrleistung von rd. 820 Mio. km. Die Verkehrsleistung beträgt rd. 3,9 Mrd. tkm.

Da die Flotte aktuell praktisch ausschließlich mit Dieselfahrzeugen ausgestattet ist, ergeben sich aus der Fahrleistung entsprechende Emissionen von THG. Diese liegen bei der Fahrzeugklasse N1 bei rd. 25.000 t CO_{2e}, bei der Fahrzeugklasse N2 sind es rd. 351.000 t CO_{2e} und bei der Fahrzeugklasse N3 werden 169.000 t CO_{2e} emittiert, so dass sich in Summe 545.000 t CO_{2e} ergeben.

Gastronomie

Die Fahr- und Verkehrsleistung im Marktsegment Gastronomie wurde auf die verschiedenen Fahrzeugklassen aufgeteilt. Die aggregierten Ergebnisse zeigen, dass die Gesamtverkehrsleistung 51,6 Mio. tkm beträgt, mit einer Fahrleistung von 8,9 Mio. km. Die Fahrzeuge in der Gastronomie decken alle gängigen Größenklassen ab. Die größte Fahrleistung (rund 2,5 Mio. km) und Transportleistung (rund 35,2 Mio. tkm) wurde von Sattelzügen erbracht.

Die Emissionen von Treibhausgasen (THG) und Luftschadstoffen wurden ebenfalls aufgeschlüsselt. Die THG-Emissionen wurden je Fahrzeugklasse berechnet und variieren von 600 t CO_{2e} für Fahrzeuge bis 7,5 t bis 3.700 t CO_{2e} für Sattelzüge.

Handwerk

Im Segment Handwerk wird der Großteil der Fahrleistung mit Pkw bzw. Kleintransportern der Fahrzeugklasse N1 erbracht (79%). Die Fahrzeugklassen N2 (11%) und N3 (10%) kommen in wesentlich geringerem Umfang zum Einsatz.

Teilweise werden umfangreiche Materialien transportiert, teilweise dienen die Fahrten aber auch hauptsächlich der Personenbeförderung zum Einsatzort bzw. das Fahrzeug wird als „rollende Werkstatt“ genutzt. Dementsprechend variiert die Verkehrsleistung zwischen den Fahrzeugklassen. Für die Klasse N1 sind es 1,4 Mrd. tkm, für die Klasse N2 sind es 952 Mio. tkm und in der Klasse N3 werden 2,22 Mrd. tkm erbracht, so dass sich in Summe 4,5 Mrd. tkm ergeben.

Bei den THG-Emissionen entfällt der größte Anteil auf die Fahrzeugklasse N1; es sind rd. 1,1 Mio. t CO_{2e}. In der Klasse N2 werden rd. 230.000 t CO_{2e} ausgestoßen und die Klasse N3 emittiert 475.000 t CO_{2e}, so dass sich in Summe rd. 1,8 Mio. t CO_{2e} ergeben.

Abfalllogistik

Die Berechnungen der Fahr- und Transportleistung basieren auf Daten für Siedlungsabfälle und Bau- und Abbruchabfälle im Holsystem der Abfalllogistik. Die jährliche Fahrleistung im Bereich Abfalllogistik in urbanen Räumen beträgt insgesamt ca. 0,7 Mrd. km mit einer Transportleistung von rund 15 Mrd. tkm über alle betrachteten Stoffströme und Abfallarten.

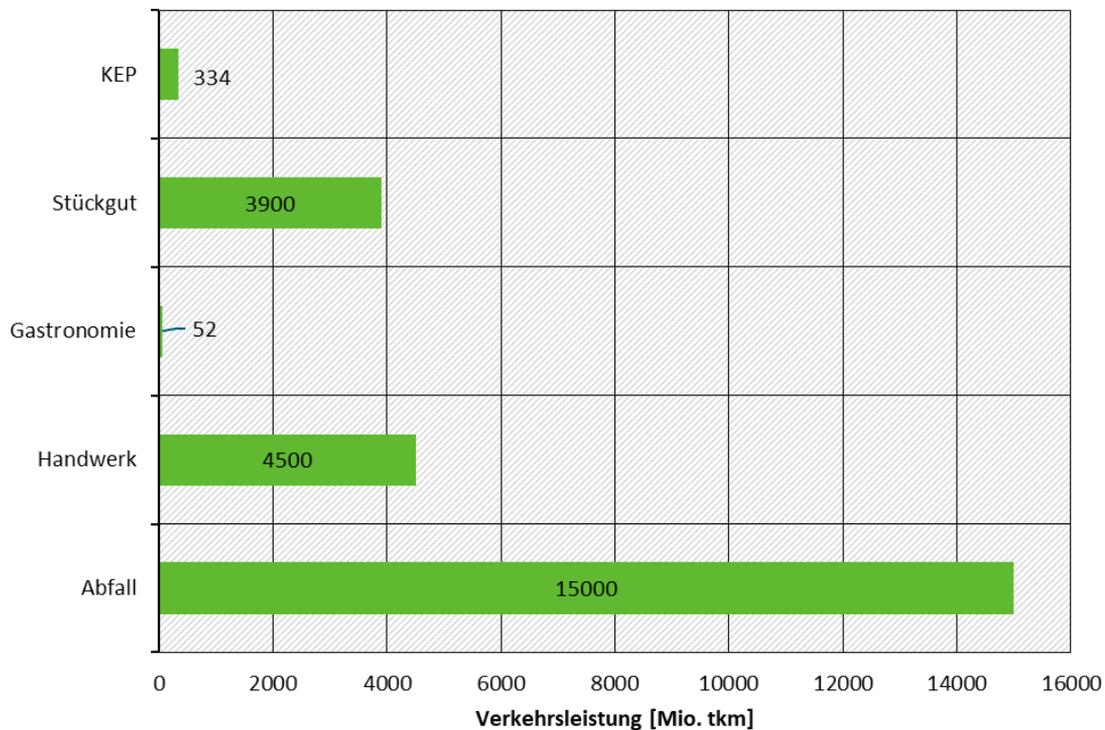
Bau- und Abbruchabfälle weisen den größten Anteil der jährlichen Tonnenkilometer aus, während Siedlungsabfälle, wie Restabfall, Bioabfall, Altpapier, Sperrabfall und (Leicht-) Plastik, geringere Transportleistungen haben. Die THG-Emissionen betragen rund 1,05 Mio. t CO_{2e} und werden hauptsächlich durch dieselbetriebene Fahrzeuge verursacht.

Vergleichende Auswertung

Bei den Fahrleistungen dominiert – auch aufgrund der großen Anzahl Mitarbeiter in diesem Segment – das Handwerk mit 4,4 Mrd. km. Die Segmente Stückgut, Abfall und KEP liegen bei 820 Mio. km, 700 Mio. km und 640 Mio. km. Das Segment Gastronomie weist eine Fahrleistung von rund 9 Mio. km.

In Abbildung 4 wird die Verkehrsleistung der einzelnen Segmente vergleichend gegenübergestellt. Hier dominiert das Segment Abfall mit 15 Mrd. tkm. Das Segment Handwerk erbringt 4,5 Mrd. tkm und das Segment Stückgut hat eine Transportleistung von 3,9 Mrd. tkm. Im Segment KEP sind es 334 Mio. tkm und im Segment Gastronomie 52 Mio. tkm.

Abbildung 4: Verkehrsleistungen der betrachteten Segmente



Quelle: eigene Darstellung, Summation der Verkehrsleistungen der einzelnen Fahrzeugklassen je Segment

Flächenbelegung und Trennwirkung durch Verkehr

Neben der Betrachtung der Umweltwirkungen (THG-Emissionen und Luftschadstoffe) wurde auch die Flächenbelegung untersucht. Dabei wurden neben der reinen Flächenbelegung auch die dazugehörigen Umweltwirkungen mittels des Hemerobie-Konzeptes bewertet. Dieses Konzept beschreibt jeweils die Naturferne einer bestimmten Flächennutzung, dabei gelten die meisten (linearen) Straßen- oder Schienenverkehrsflächen als versiegelte Flächen, da hier keine Vegetation möglich ist. Böschungen aber auch Mittelstreifen sowie Abstandsflächen an Flughäfen hingegen sind etwas naturnäher eingestuft. Da im Verkehr genutzten Flächen oftmals von verschiedenen Verkehrsmitteln des Personen- und Güterverkehrs geteilt werden, wurde eine Allokation anhand des Produktes aus Fahrzeuglänge und Spurbreite multipliziert mit der Fahrleistung des Fahrzeuges vorgenommen.

Zudem wurde ein Konzept zum Einbezug einer Barriere- bzw. Trennwirkung durch die Verkehrsinfrastruktur, welche ein oftmals lineares Hindernis darstellt, entwickelt. Damit soll der Tatsache Rechnung getragen werden, dass Verkehrsinfrastruktur auch über die eigentlich belegte Fläche hinaus einen Einfluss auf die benachbarten Flächen und ihren ökologischen Wert hat. In diesem Bericht wurden die Zerschneidungskriterien für Wildnisgebiete des BfN genutzt, und die Infrastruktur in verschiedene Kategorien mit unterschiedlich großen Pufferbereichen aufgeteilt.

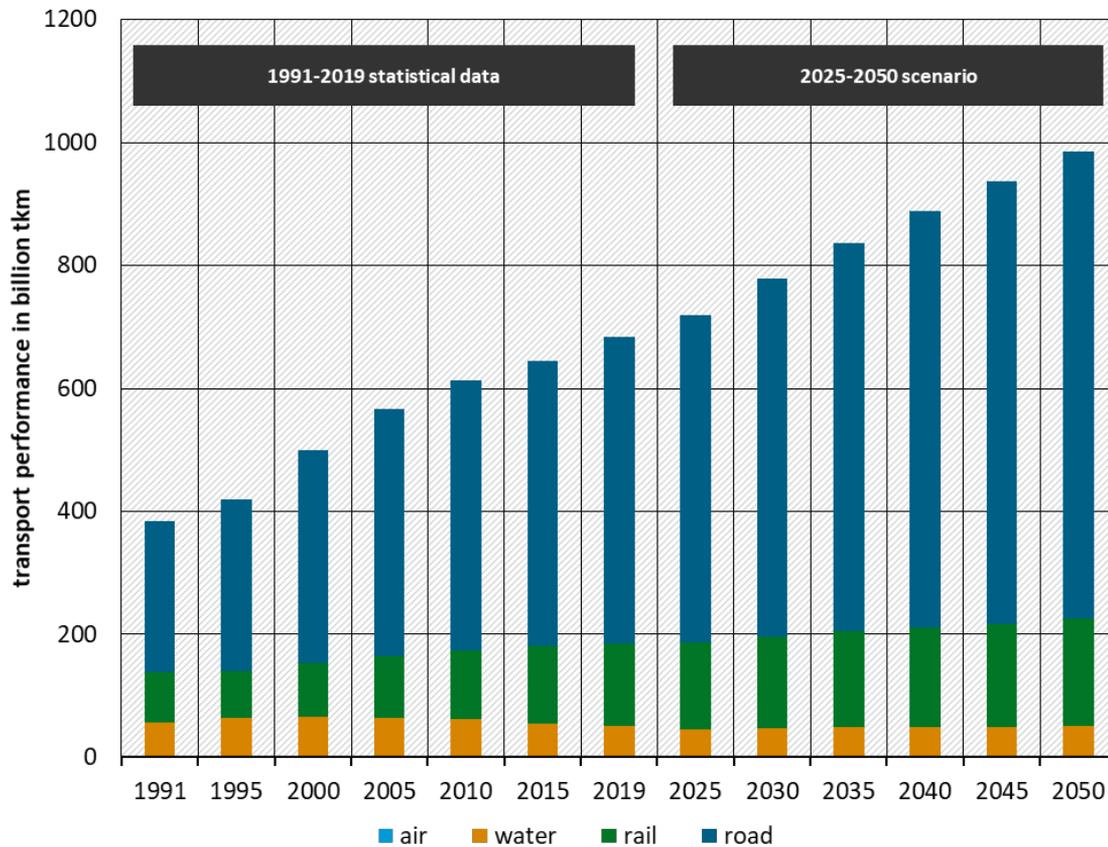
Summary

Freight transport by lorry, rail, ship and air plays a central role in supplying the economy and society with goods. However, freight transport is also associated with environment risks, for example through the emission of greenhouse gases and air pollutants. The following report analyses data on transport demand and the environmental impact of freight transport. The first chapter deals with national and international freight transport, the second chapter deals with various segments of urban logistics and the third chapter analyses the effects on land use.

National and international freight transport

The analysis of national freight transport presented below is based on data from the TREMOD model (version 6.43). From 1991 to 2019, freight transport performance in Germany increased by more than 70%. This growth is primarily attributable to road freight transport (see figure 1). According to the Federal Ministry for Digital and Transport's (BMDV) long-term forecast from (Intraplan/Trimode 2023), a further increase in freight transport performance is likely with a focus on road transport. Currently, freight transport uses almost exclusively fossil fuels. As part of the GHG emissions to be reported for the Climate Protection Act, freight transport emitted approximately 54 million tonnes of CO_{2e} in 2019 and was therefore responsible for about 1/3 of the GHG emissions of the entire transport sector. Approximately 98% of the GHG emissions from freight transport were caused by road.

Figure 1: Development of freight transport performance in Germany from 1990 to 2019 and according to forecast to 2050



Source: own illustration, ifeu based on TREMOD 6.43. Note: Freight transport excluding pipelines. Data for the forecast from (Intraplan/Trimode 2023) was available for 2036, 2041, 2046, 2051. The intermediate years were supplemented by ifeu.

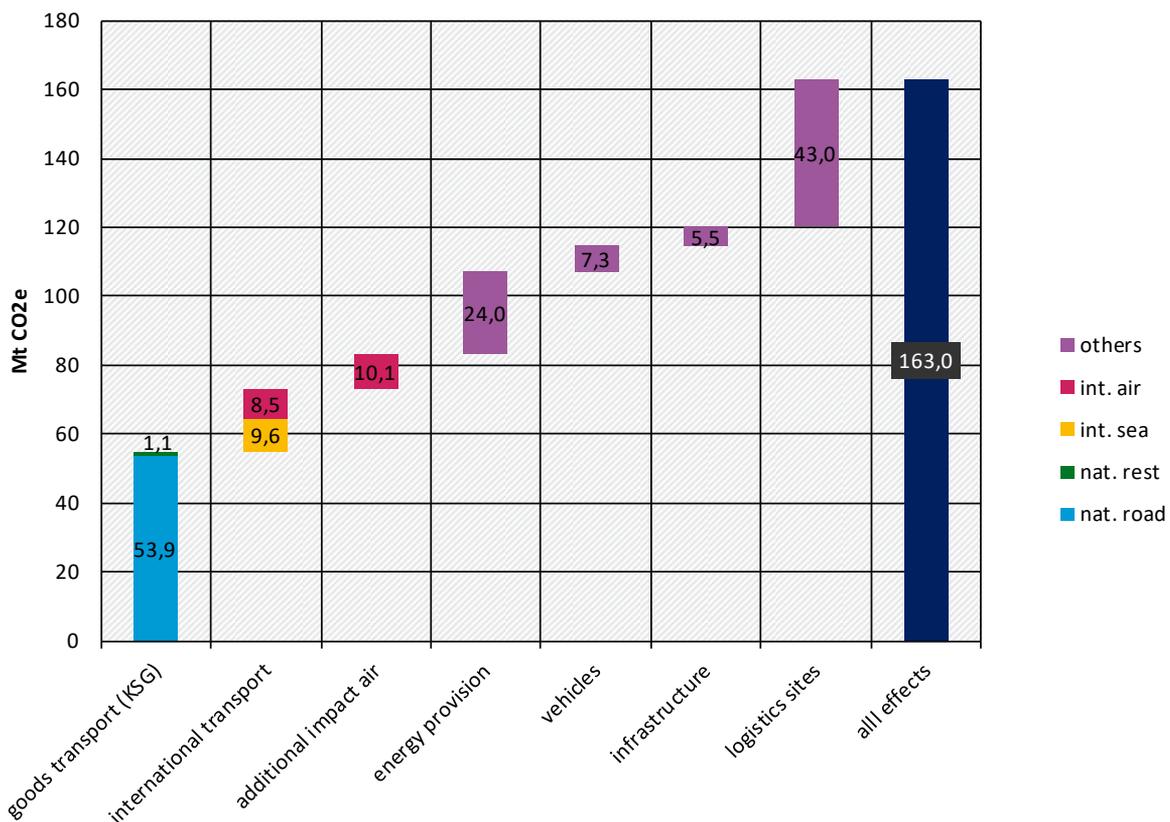
A wide variety of goods are transported by road. Heavy duty vehicles (HDVs) with a GVW of more than 28 tonnes are responsible for the majority of the transport activity. Bulk goods are primarily transported by rail and inland waterway. Due to their high energy efficiency and, in the case of rail, the high proportion of electric traction, these two modes of transport perform significantly better than road transport in terms of average GHG emissions per tonne-kilometre in 2019. HDVs contribute most to air pollution within freight transport throughout Germany, albeit less than diesel cars.

International freight transport is used to export and import goods. Here sea and air transport were analysed. In addition to TREMOD, additional data sources such as the maritime transport statistics and the foreign trade statistics of the Federal Statistical Office were also evaluated. Intercontinental transport accounts for the majority of transport performance, whereby imports clearly dominate in terms of the volume of goods (in tonnes). While the transport performance of maritime transport is higher than the sum of domestic transport, the transport performance of air freight transport is very low, as transport by air is more expensive than by sea. Although air freight transport provides 99 % less transport performance than maritime transport, its overall climate impact is approximately 60 % higher. The around 160-fold higher emission factor of air transport is explained by its high energy intensity as well as the additional climate impact of air transport at high altitudes. It therefore has by far the highest specific GHG emissions per tonne-kilometre compared to other types of freight transport. International transport to and from Germany increases the greenhouse gas effect of freight transport from 54

million tonnes CO_{2e} to over 80 million tonnes of CO_{2e} (using the system boundaries described in this report).

In addition to direct emissions from the combustion of fuel, freight transport causes emissions for the provision of energy, vehicle production, infrastructure and warehousing. To this end, data from the TREMOD model and various UBA studies were compiled and an estimate of these emissions was made for German freight transport in 2019. Including these effects, the GHG emissions of 160 million tonnes of CO_{2e} are 3 times the value recorded in the KSG (see figure 2). Even if these are not accounted for in the transport sector, they can be reduced by measures taken by freight forwarders, companies in the retail sector or production companies, for example.

Figure 2: Climate impact of German freight transport in 2019 according to the climate protection act (KSG) and considering other effects



Source: ifeu. Notes: Freight transport according to KSG: Source TREMOD 6.43, only direct emissions (TTW) of fossil fuels and according to the energy balance principle; international transport: analyses in this report, energy supply: source TREMOD 6.43 and analyses in this report; vehicle production and infrastructure, see appendix: (Allekotte et al. 2020) and Analysis in this report; warehouse operation (only concerns warehouses in Germany): UBA project PULK (2024 forthcoming)

The future development of freight transport was analysed in a trend scenario up to 2050. According to the BMDV's long-term forecast, a further increase in freight transport, particularly for road transport, is assumed (see also Figure 1). At the same time, a strong uptake of electric lorries is assumed due to falling prices as well as tightened legal limits for CO₂ emissions from lorry fleets. Nevertheless, greenhouse gas emissions are likely to decline slowly up to 2030. According to the KSG, national freight transport would still emit around 50 million tonnes of CO_{2e} in 2030. This corresponds to almost 60% of the maximum permitted quantity of 84 million

tonnes of CO_{2e} for all national transport under the KSG. Climate neutrality by 2045 is unlikely to be achieved with the existing measures for freight transport.

A stronger decline is assumed for air pollutant emissions, as both the increase in electromobility and the shift towards vehicles with newer emission standards (Euro 6/VI) are having an effect due to the phasing out of older vehicles.

Traffic volumes and environmental impact of urban logistics

Urban areas have special logistics conditions. The high traffic load, entry restrictions for lorries, high stop density, low availability of loading and unloading zones are just some of the aspects that have an impact on inner-city routes. In order to make statements on the transport performance, the vehicles used and the resulting environmental impacts of urban logistics, an approach based on population density was chosen. As shown in the map below, this is based on the categorisation of the regional statistical spatial typology (RegioStaR) of the BMDV (BMDV 2021).

Postcode areas are still an important basis for logistics for planning tour areas and tours in Germany. Additionally, many logistics indicators refer to this geographical subdivision. For the analysis of urban logistics, all postcode areas with a sufficiently high population density (>607 inhabitants/km²) according to the chosen spatial types were selected. According to this definition, 39.5 million people in Germany live in urban areas. This corresponds to 47.5% of the total population.

Figure 3: Urban spaces according to RegioStaR



Source: Fraunhofer IML (Digital maps: AND, OSM; Demographic information: GfK)

Urban delivery is part of commercial transport, which describes the transport of goods and merchandise in urban areas. It is usually served by delivery vans, lorries or other types of vehicles such as micro-vehicles or cargo bikes. No statistical data on transport volumes and services are available to analyse urban delivery traffic, as the distinction between this and commercial transport is often blurred, and no generally applicable methodology is available. This study therefore develops an approach that analyses individual, relevant segments of urban delivery traffic separately. The transport purposes were divided into the following market segments: CEP, general cargo, gastronomy, food, crafts and waste logistics. The results from the individual segments are presented below. The used modelling approaches represent an approximation for estimating the order of magnitude of the selected market segments.

Courier, express and parcel (CEP)

Around 1.2 billion B2C parcels and 700 million B2B parcels were delivered in urban areas in 2021. That is around 4.5 million parcels per delivery day. Around 28 700 vehicles per day are

used for B2C deliveries in urban areas. In the B2B area, 14 400 N1 vehicles and 2 000 N2 vehicles make deliveries every day.

The delivery routes of CEP vehicles take place during busy traffic times and are characterised by many stops and only short distances between stops. In total, delivery vehicles in urban areas cover over 640 million kilometres, including a 29% proportion of battery-powered vehicles.

With a total transport performance of 334 million tkm, the total well-to-wheel GHG emissions of conventional diesel vehicles are around 161 100 tonnes of CO_{2e}. The already high proportion of battery-electric vehicles in the CEP segment leads to a significant reduction in GHG emissions.

General cargo

In the general cargo segment, groupage and distribution transport in urban areas were analysed. The main transport services here are provided by vehicle classes N2 (70% share of consignments) and N3 (27.5% share of consignments).

With a typical tour length of 200 km and a number of stops between 10 and 13, this results in a distance travelled of around 820 million km on the basis of 120 million shipments in Germany per year - of which around 57 million are in urban areas. The transport performance amounts to around 3.9 billion tkm.

As the fleet is currently almost exclusively equipped with diesel vehicles, the mileage results in corresponding GHG emissions. These are around 25 000 tonnes of CO₂ e for vehicle class N1, around 351 000 tonnes of CO_{2e} for vehicle class N2 and 169 000 tonnes of CO_{2e} for vehicle class N3, resulting in a total of 545 000 tonnes of CO_{2e}.

Gastronomy

The mileage and transport performance in the catering market segment was distributed over various vehicle classes. The aggregated results show that the total transport performance amounts to 51.6 million tkm, with a mileage of 8.9 million km. The vehicles in the catering industry cover all common size classes. The highest mileage (around 2.5 million km) and transport performance (around 35.2 million tkm) has been achieved by articulated lorries. The GHG emissions were calculated per vehicle class and vary from 600 tonnes of CO_{2e} for vehicles up to 7.5 tonnes to 3,700 tonnes of CO_{2e} for articulated lorries.

Crafts

In the skilled trades segment, the majority of journeys are made by vans in vehicle class N1 (79%). Vehicle classes N2 (11%) and N3 (10%) are used to a much lesser extent. Sometimes extensive materials are transported, however the journeys are mainly used to transport people to the place of use or the vehicle is used as a "rolling workshop". Accordingly, the transport performance varies between the vehicle classes. For class N1 it is 1.4 billion tkm, for class N2 it is 952 million tkm and in class N3 it is 2.22 billion tkm, resulting in a total of 4.5 billion tkm.

The largest share of GHG emissions is attributable to vehicle class N1; around 1.1 million tonnes of CO_{2e} are emitted. Class N2 emits around 230,000 tonnes of CO_{2e} and class N3 emits 475,000 tonnes of CO_{2e}, resulting in a total of around 1.8 million tonnes of CO_{2e}.

Waste

The calculations of driving and transport performance are based on data for municipal waste and construction and demolition waste in the waste logistics collection system. The annual mileage of waste logistics in urban areas totals 0.7 billion kilometres with a transport performance of around 15 billion tkm across all material flows and waste types considered. Construction and demolition waste accounts for the largest share of annual tonne-kilometres,

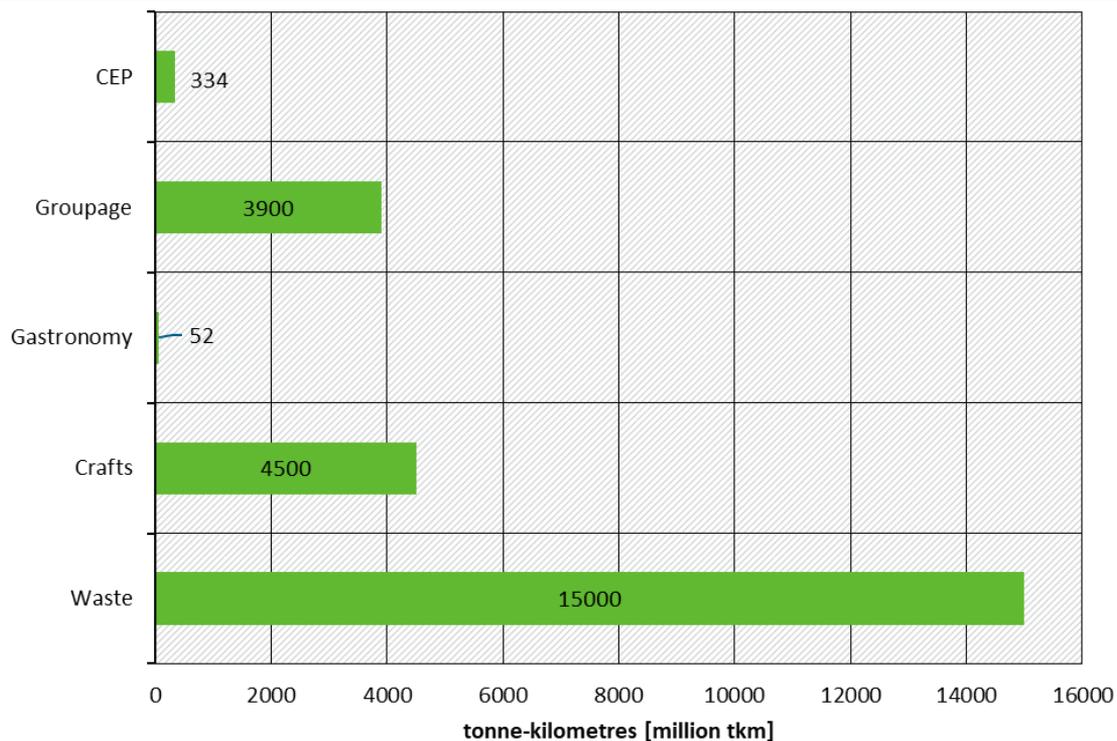
while municipal waste, such as residual waste, biowaste, waste paper, bulky waste and (lightweight) plastic, has a lower transport performance. GHG emissions amount to around 1.05 million tonnes of CO_{2e} and are mainly caused by diesel-powered vehicles.

Comparative evaluation

Due to the large number of employees in this segment, the craft sector dominates with 4.4 billion km. The general cargo, waste and CEP segments cover 820 million km, 700 million km and 640 million km respectively. The catering segment has a mileage of around 9 million km.

Figure 4 compares the transport performance of the individual segments. Here, the waste segment dominates with 15 billion tkm. The trade segment accounts for 4.5 billion tkm and the general cargo segment has a transport performance of 3.9 billion tkm. In the CEP segment, the figure is 334 million tkm and in the catering segment 52 million tkm.

Figure 4: Tonne-kilometres of the different segments



Source: own representation, summation of the tonne-kilometres of the individual vehicle classes per segment

Land use and land fragmentation due to transport

In addition to analysing the environmental impacts (GHG emissions and air pollutants) of freight transport, land occupation was also examined. Furthermore, the associated environmental impacts were also assessed using the hemeroby concept. This concept describes how far from a natural state a particular type of land is. Most (linear) road or railway traffic areas are considered sealed areas, as no vegetation is possible here. On the other hand, embankments and airport clearance areas are categorised closer to nature. As areas used for transport are often shared by different means of passenger and freight transport, an allocation was made based on the product of vehicle length and lane width multiplied by the vehicle's mileage.

In addition, a concept was developed to incorporate the barrier or separating effect of transport infrastructure, which often represents a linear obstacle. This is intended to consider the fact that transport infrastructure also has an impact on neighbouring areas and their ecological value

beyond the area actually occupied. In this project, the BfN's fragmentation criteria for wilderness areas were used and the infrastructure was divided into different categories with buffer areas of different sizes.

1 Emissionen des nationalen und internationalen Güterverkehrs

Der nationale und internationale Güterverkehr per Lkw, Bahn, Schiff und Flugzeug erfüllt eine zentrale Rolle für die Versorgung der Wirtschaft und der Gesellschaft sowie für den Handel mit Waren. Seit den 1990er Jahren ist die Verkehrsleistung des Güterverkehrs in Deutschland um mehr als 50% gestiegen, wobei dieser Zuwachs vor allem auf den Straßengüterverkehr zurückgeht.

Damit sind jedoch auch Risiken für die Umwelt verbunden. Bisher deckt der Güterverkehr seinen Energiebedarf fast ausschließlich aus fossilen Kraftstoffen. Im Jahr 2019 verursachte er etwa ein Drittel der Treibhausgasemissionen des gesamten Verkehrssektors und damit sowohl prozentual als auch absolut mehr THG-Emissionen als noch im Jahr 1990. Eine Fortsetzung dieser Entwicklung würde die Einhaltung der nationalen Klimaschutzziele für das Jahr 2030 sowohl für den Verkehr als auch sektorenübergreifend vor große Herausforderungen stellen (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Treibhausgasemissionen (Mio. t CO_{2e}) des Güterverkehrs in Deutschland 1990-2019

Sektor	1990	2010	2015	2019	2030 (Ziel)
Alle Sektoren	1.251	932	897	795	440
davon Verkehr	163	153	162	164	84
davon Güterverkehr	37	49	53	55	n. a.

Quelle: Alle Sektoren und Verkehr: (UBA 2023a), Güterverkehr: ifeu-Berechnungen mit TREMOD 6.43. Anmerkung: Ziel 2030 entsprechend der Novelle des Bundes-KSG vom 12.05.2021, Jahre 2022-2030 angepasst an Über- & Unterschreitungen

Das folgende Kapitel soll einen Überblick über die Umweltwirkungen des nationalen und internationalen Güterverkehrs geben, indem die mit ihm verbundenen THG- und Schadstoffemissionen und die dafür relevanten Einflussparameter detailliert dargestellt werden.

1.1 Methodischer Rahmen

1.1.1 Betrachtete Emissionen

Der Hauptfokus bei den betrachteten Umweltwirkungen liegt auf den Treibhausgas (THG)-Emissionen. Das Ausstoßen und die Anreicherung von Treibhausgasen, z. B. Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O), in der Atmosphäre führt zur globalen Klimaerwärmung. Im Zuge des Pariser Klimaabkommens haben sich die beteiligten Staaten verpflichtet, den Temperaturanstieg gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter auf 1,5 °C zu begrenzen.

Die Europäische Union hat sich das Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55% gegenüber 1990 zu reduzieren und bis zum Jahr 2050 treibhausgasneutral zu werden. Deutschland hat darüber hinaus das Klimaschutzgesetz (KSG) beschlossen, welches zusätzliche Ziele für die einzelnen Sektoren, darunter den Verkehr, beinhaltet. Die THG-Emissionen des Verkehrs entstehen vor allem durch die Verbrennung fossiler Kraftstoffe, insbesondere Benzin, Diesel, Kerosin und Heizöl.

Info: Bilanzierung von THG-Emissionen im Verkehr

Die Bilanzierung von THG-Emissionen kann nach unterschiedlichen Methoden erfolgen. Ein Aspekt ist hierbei die räumliche Systemgrenze. In der **THG-Berichterstattung im Rahmen des Klimaschutzgesetzes (KSG)** wird nur der nationale Verkehr erfasst. Er wird über die **Energieabsatz-Bilanz** gemessen, d. h. die in Deutschland verkauften Kraftstoffmengen.

Internationale Verkehre können hierbei enthalten sein, aber nicht von den nationalen Verkehren unterschieden werden. Beim Luft- und Seeverkehr werden die Kraftstoffmengen für den internationalen Verkehr (sog. internationale Bunkerungen) abgezogen und nicht den nationalen Emissionen zugerechnet. In der vorliegenden Studie werden der Luft- und Seeverkehr hingegen über die Binnen-Quell-Ziel-Bilanz untersucht, d. h. es wird bei internationalen Verkehren jeweils die Hälfte der Treibhausgasemissionen für alle abgehenden und ankommenden Verkehre angerechnet. Ein weiterer Aspekt ist die Lebenszyklusphase. Im KSG werden nur die direkten THG-Emissionen aus der Nutzungsphase (Tank-to-Wheel) dem Verkehr zugerechnet und sonstige Emissionen, sofern sie in Deutschland entstehen, anderen Sektoren.

Für die Bilanzierung der **THG-Emissionen von Transportvorgängen**, z. B. in Unternehmen, existiert hingegen die neue ISO 14083 (ISO 14083 2023). Hierbei sind neben den direkten Emissionen auch die vorgelagerten Emissionen aus der Kraftstoff- sowie Strombereitstellung sowie THG-Emissionen aus Kühlmittelverlusten und von Hub-Prozessen zu bilanzieren.

Als **Luftschadstoffe** werden in der vorliegenden Studie Stickoxid (NO_x)- und Partikelemissionen (PM10), bzw. für einige Verkehrsträger auch Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC) und SO₂ untersucht. Die Luftschadstoffemissionen müssen zum einen im Rahmen der sogenannten NEC (national emission ceiling)-Richtlinie (EU) 2016/2284) berichtet werden, wobei die jährlichen Gesamtmengen pro EU-Mitgliedstaat ausschlaggebend sind. Zum anderen erfordert die europäische Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG die Überwachung und Einhaltung der Luftqualität an verschiedenen Messstellen, wofür bestimmte Konzentrationen u.a. für PM10 oder NO₂ nicht überschritten werden dürfen. Neben der Beeinträchtigung der Gesundheit von Organismen über die Atemwege führen Luftschadstoffe, z. B. NO_x oder SO₂, auch zur Versauerung und Eutrophierung von Ökosystemen.

Als weitere Umweltwirkungen werden im Kapitel 3 der Verbrauch von Flächen bzw. die Trennwirkung durch den Verkehr untersucht.

1.1.2 Modell TREMOD und das TREMOD-Trendszenario

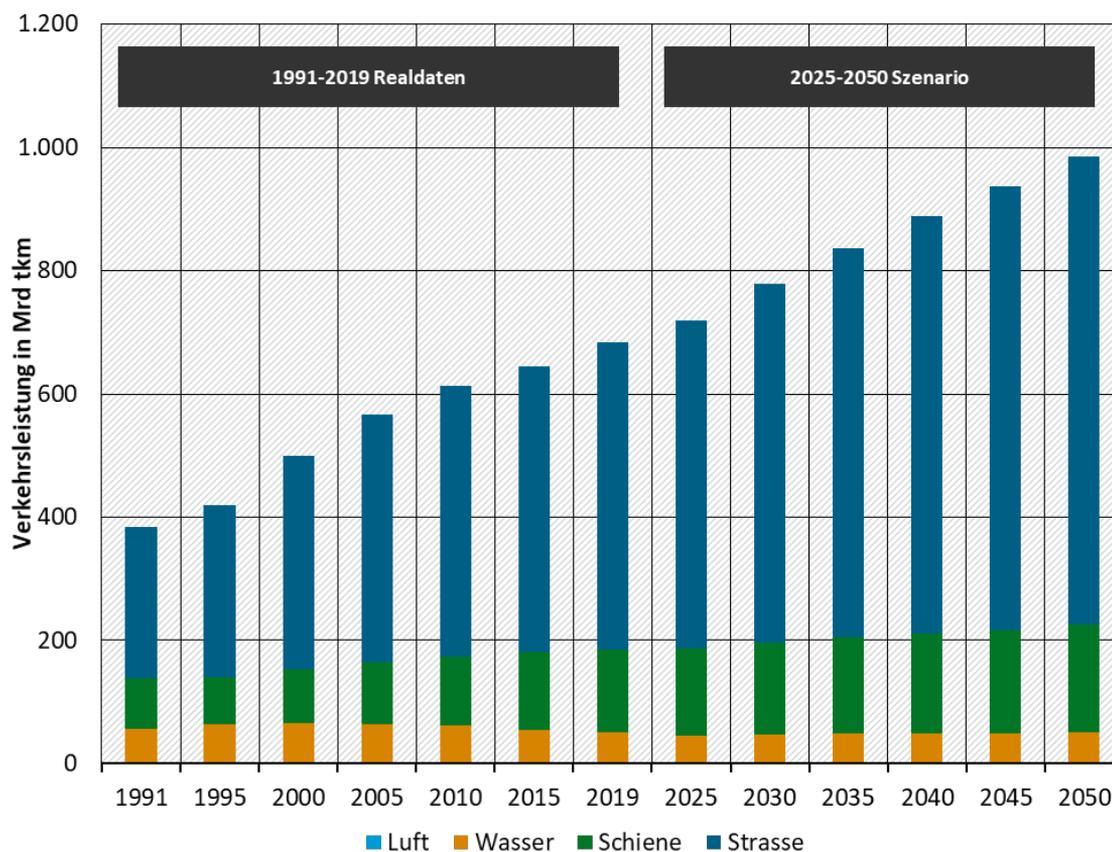
Die Bewertung der Umweltwirkungen, d. h. der THG- und Luftschadstoffemissionen erfolgt, soweit nicht anders angegeben, mit Daten des TREMOD-Modells (Allekotte et al. 2024). In TREMOD werden die Emissionen aller motorisierten Verkehre in Deutschland, darunter auch des Straßen-, Schienen-, Binnenschiff- und Luftgüterverkehrs in einer Zeitreihe ab 1960 bis 2050 berechnet. Datengrundlagen sind verschiedene Erhebungen zu den Fahrzeugbeständen, Fahr- und Verkehrsleistungen sowie Energieverbrauchs- und Emissionsfaktoren. Sogenannte Realdaten werden jährlich mit Daten, z. B. des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA), der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), verschiedenen Verkehrsstatistiken des statistischen Bundesamtes (DESTATIS) und der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) fortgeschrieben bzw. aktualisiert. Für den Zeitraum des letzten Realjahres (in dieser Studie wird das Jahr 2019, als letztes Jahr vor der Corona-Pandemie sowie Basisjahr der gleitenden Langfristprognose des BMDV (Intraplan/Trimode 2023), betrachtet) bis 2050 verfügt TREMOD über ein Trendszenario. Dieses soll die Entwicklung unter den bisher beobachteten Trends im Verkehr und bereits beschlossenen politischen Instrumenten abbilden und die damit verbundenen

verkehrlichen und ökologischen Wirkungen aufzeigen. Es ist damit grundsätzlich vergleichbar mit dem Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsberichtes der Bundesregierung. Die relevanten Annahmen werden in den Kapiteln zu den einzelnen Verkehrsträgern näher ausgeführt.

1.1.3 Verkehrsleistungen des Güterverkehrs in Deutschland

Die Verkehrsleistungen des Güterverkehrs in Deutschland werden statistisch erfasst und regelmäßig aktualisiert. Veröffentlichungen dazu gibt es unter anderem vom statistischen Bundesamt, in der Publikation „Verkehr in Zahlen“ (ViZ) sowie auch im Rahmen der Verkehrsprognosen des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV).

Abbildung 5: Entwicklung der Verkehrsleistungen des Güterverkehrs in Deutschland von 1991 bis 2019 sowie laut gleitender Langfristprognose bis 2050



Quelle: eigene Darstellung, ifeu basierend auf TREMOD 6.43. Anmerkung: Güterverkehr ohne Rohrfernleitungen. Daten aus der gleitenden Langfristprognose lagen für 2036, 2041, 2046, 2051 vor. Die Zwischenjahre wurden von ifeu ergänzt.

Der Güterverkehr in Deutschland stieg in den letzten Jahren kontinuierlich an (Abbildung 5). Somit lag die Verkehrsleistung des Straßen-, Schienen-, Binnenschiff- und des inländischen Luftverkehrs im Jahr 1991 bei 384 Mrd. Tonnenkilometern (tkm) und im Jahr 2019 bei 683 Mrd. tkm, also um 78 % höher als im Jahr 1991.

Für die Entwicklung bis zum Jahr 2050 geht die gleitende Langfristprognose (GLP) des BMDV (Intraplan/Trimode 2023) von einer weiteren Zunahme der Güterverkehrsleistung aus, wie Abbildung 5 verdeutlicht. Diese Prognose wurde für das Trendszenario dieser Studie übernommen, um die THG- und Luftschadstoffemissionen des Verkehrssektors, welche mit der zu erwartenden Bundesverkehrswegeplanung des BMDV verbunden sind, zu untersuchen. In

der GLP nicht enthaltene Zwischenjahre, z. B. 2050, wurden jeweils linear interpoliert und fehlende Angaben, z. B. Entwicklung internationaler Verkehr, anhand weiterer Studien ergänzt. Die zukünftige Verkehrsentwicklung hängt jedoch neben externen Faktoren, z. B. der Wirtschaft, auch von politischen Zielsetzungen und Instrumenten ab. Andere Szenarien gehen beispielsweise von einem geringeren Wachstum im Straßengüterverkehr aus, siehe z. B. die UBA RESCUE Studien (Dittrich et al. 2019). Grundsätzlich steigt die Herausforderung, einen treibhausgasneutralen Verkehrsbereich zu erreichen, mit steigenden Verkehrsleistungen deutlich an. In der gleitenden Langfristprognose sind einige grundlegende Trendänderungen abgebildet wie z. B. steigende CO₂- Preise, eine alternde Bevölkerung und dadurch ein Rückgang der Erwerbstätigen (trotz verstärkter Zuwanderung) sowie der Kohleausstieg und Steigerungen bei den Energiepreisen. Dadurch kommt es zu deutlichen Verschiebungen in den transportierten Gütern. So fallen vor allem Massenguttransporte weg, während andere Gütergruppen (vor allem Stückgüter) deutlich zunehmen.

Damit erfolgt der Anstieg der Verkehrsleistung vor allem im Straßengüterverkehr. Die Güterbahnen konnten geringe Zuwächse erreichen (vor allem durch Zuwächse im kombinierten Verkehr), während die Binnenschifffahrt leicht abnahm. Der Anteil des Straßengüterverkehrs am Modal Split stieg somit von 52 % im Jahr 1990 auf 73 % im Jahr 2019 (bezogen auf die tkm).

Die dargestellten Verkehrsleistungen bilden die Grundlage für die Ermittlung der Umweltwirkungen der einzelnen Verkehrsträger im inländischen Verkehr in den Kapiteln 1.2 bis 1.4. Die Verkehrsmengen des Internationalen See- und Luftverkehrs 1.5 und 1.6 wurden mithilfe anderer Quellen abgeleitet, da sie in den Veröffentlichung zur GLP (Intraplan/Trimode 2023) nur am Rande betrachtet werden.

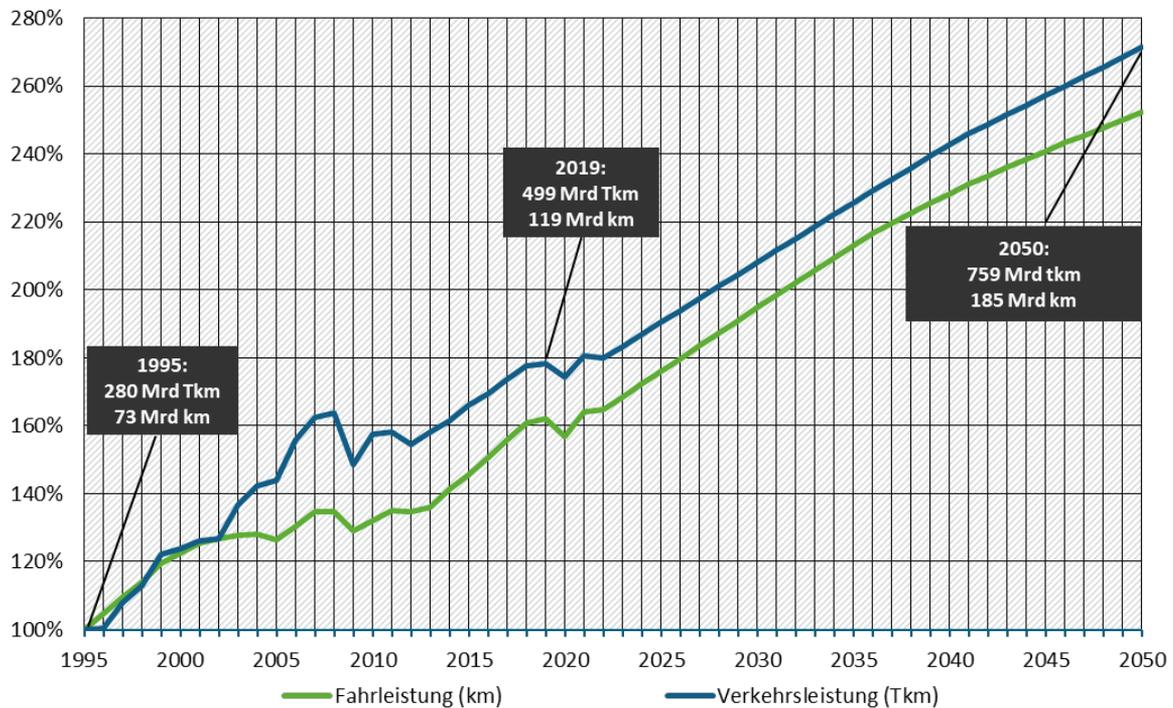
1.2 Straßengüterverkehr

1.2.1 Verkehrsmengen und Fahrzeugflotten

Der Straßengüterverkehr hat den größten Anteil an der Transportleistung in Deutschland (vgl. 1.1.3) und transportiert ein breites Spektrum an Gütern. Besonders relevant sind Stückguttransporte, z. B. für Nahrungs- und Genussmittel, Post und Pakete, aber es werden auch Massengüter wie Erze und Metalle per Lkw transportiert. Abbildung 6 stellt die Entwicklung der Verkehrs- und Fahrleistungen im Straßengüterverkehr auf deutschen Straßen zwischen 1995 und 2019, sowie das TREMOD-Trendszenario bis 2050 dar. Die Verkehrsleistungen steigen seit Jahren an. Lediglich in durch Sonderereignisse geprägten Jahren stagnierten sie oder nahmen ab, z. B. während der Finanzkrise 2009 oder der COVID 19-Pandemie in den Jahren 2020 und 2021. Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) geht in der aktuellen gleitenden Langfristprognose von einem weiter anhaltenden Wachstum des Straßengüterverkehrs in den kommenden Jahren % p. a. bis 2040, 1,26% danach) und Nachfrageänderungen bei bestimmten Gütergruppen aus. Während Massenguttransporte zurückgehen, erzeugt der Anstieg von straßenaffinen Gütern wie z. B. Stück- oder Sammelgütern und Postsendungen eine steigende Nachfrage von Straßentransporten (Intraplan/Trimode 2023).

Die Fahrleistung stiegen in der Vergangenheit ebenfalls an, bis zu den 2010er Jahren jedoch weniger stark als die Verkehrsleistung, da sowohl die mittlere Kapazität (bzw. die Fahrzeuggröße) als auch die Auslastung bei den schweren Nutzfahrzeugen deutlich zunahm. Seither jedoch steigen Fahrleistung und Verkehrsleistung etwa proportional zueinander an. Im Szenario bis 2050 setzt sich dieser Trend fort, da nur noch minimale Steigerungen der Auslastung bzw. Reduktion an Leerfahrten angenommen werden.

Abbildung 6: Relative Entwicklung der Verkehrs- und Fahrleistungen im Straßengüterverkehr (LNF+SNF) in Deutschland bis 2021 und im Trendszenario bis 2050 gegenüber 1995



Quelle: eigene Darstellung, ifeu basierend auf TREMOD 6.43. Anmerkung: Verkehrsleistungen aus der gleitenden Langfristprognose lagen für 2036, 2041, 2046, 2051 vor. Die Zwischenjahre wurden von ifeu ergänzt. Die Entwicklung der Fahrleistungen basiert auf eigenen Annahmen des ifeu.

Struktur des Straßengüterverkehrs im Jahr 2019

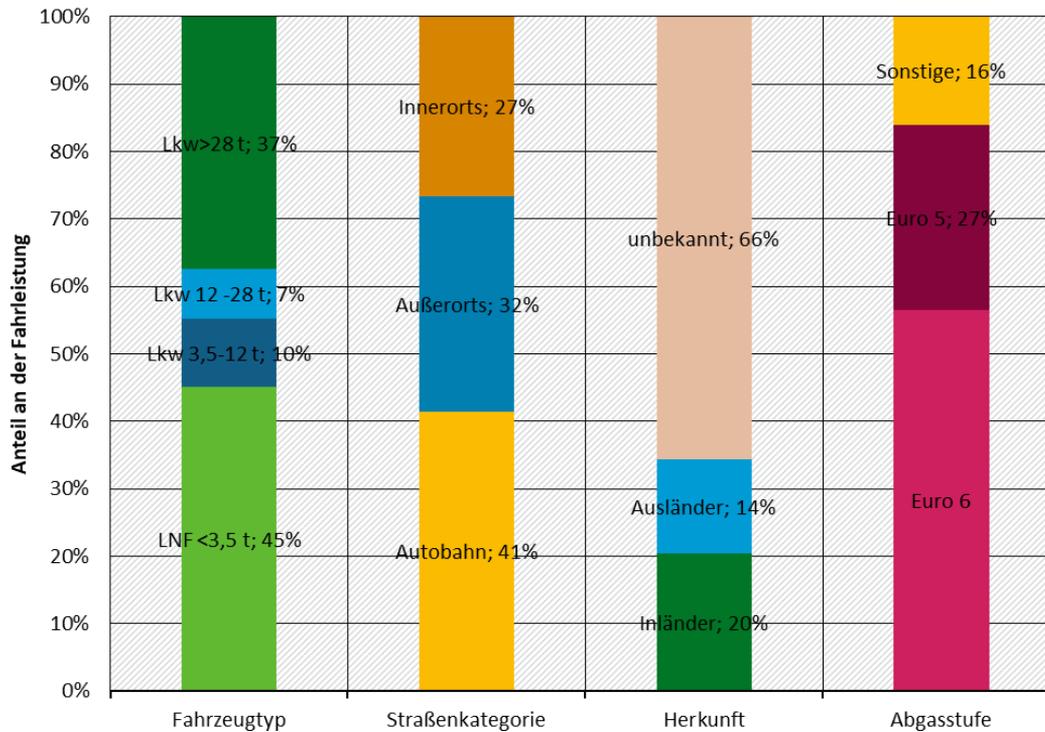
Abbildung 7 stellt die Fahrleistungsanteile des Straßengüterverkehrs im Jahr 2019 nach verschiedenen Merkmalen dar.

- ▶ Bei den Fahrzeugtypen zeigt sich der vergleichsweise hohe Anteil von 45 % an leichten Nutzfahrzeugen (LNF, zGG <3,5 t), welche u. a. für Handwerker oder KEP-Verkehre verwendet werden. Weitere Analysen zum urbanen Güterverkehr finden sich in Kapitel 2. Bei den schweren Nutzfahrzeugen überwiegen Fahrzeuge mit einer Gesamtmasse von über 28 t. Hierunter fallen vor allem Sattelzugmaschinen mit Auflieger.
- ▶ Der größte Teil des Güterverkehrs erfolgt auf den Straßenkategorien Autobahn und Außerortsstraße. Der Anteil auf Innerortstraßen ist mit 27 % dennoch relevant.
- ▶ Die Herkunft der Fahrzeuge lässt sich nur für den Teil der mautpflichtigen Fahrzeuge, d. h. Lkw >7,5 t zGG auf Bundesstraßen und Autobahnen, zuverlässig bestimmen. Insgesamt sind somit mindestens 14 % der Fahrleistungen durch ausländische und 20 % durch inländische Fahrzeuge verursacht und 66 % unbekannt.
- ▶ Bei den Hauptverkehrsbeziehungen (nicht in Abbildung 7 dargestellt) handelte es sich laut Verkehr in Zahlen bei ca. 15 % der Lkw-Verkehrsleistung um Transitverkehr, der Rest erfolgte entweder komplett innerhalb bzw. mit Start oder Ziel in Deutschland¹. (DLR und DIW 2021)

¹ 2019 waren 77,3 Mrd. tkm von insgesamt 498,6 Mrd. tkm sog. Durchgangsverkehr (Verkehr in Zahlen, 2022)

- Fahrzeuge mit der aktuell gültigen Abgasstufe Euro 6 (für LNF) bzw. Euro VI (andere Fahrzeugtypen) sind mit 56 % für den Hauptteil der Fahrleistung verantwortlich, gefolgt von der vorigen Stufe Euro 5/V. Nur 16 % der Lkw-Fahrleistung stammt von Fahrzeugen, die die Norm Euro 4/VI oder älter erfüllten.

Abbildung 7: Anteil der Fahrleistungen im Straßengüterverkehr in Deutschland nach verschiedenen Merkmalen im Jahr 2019



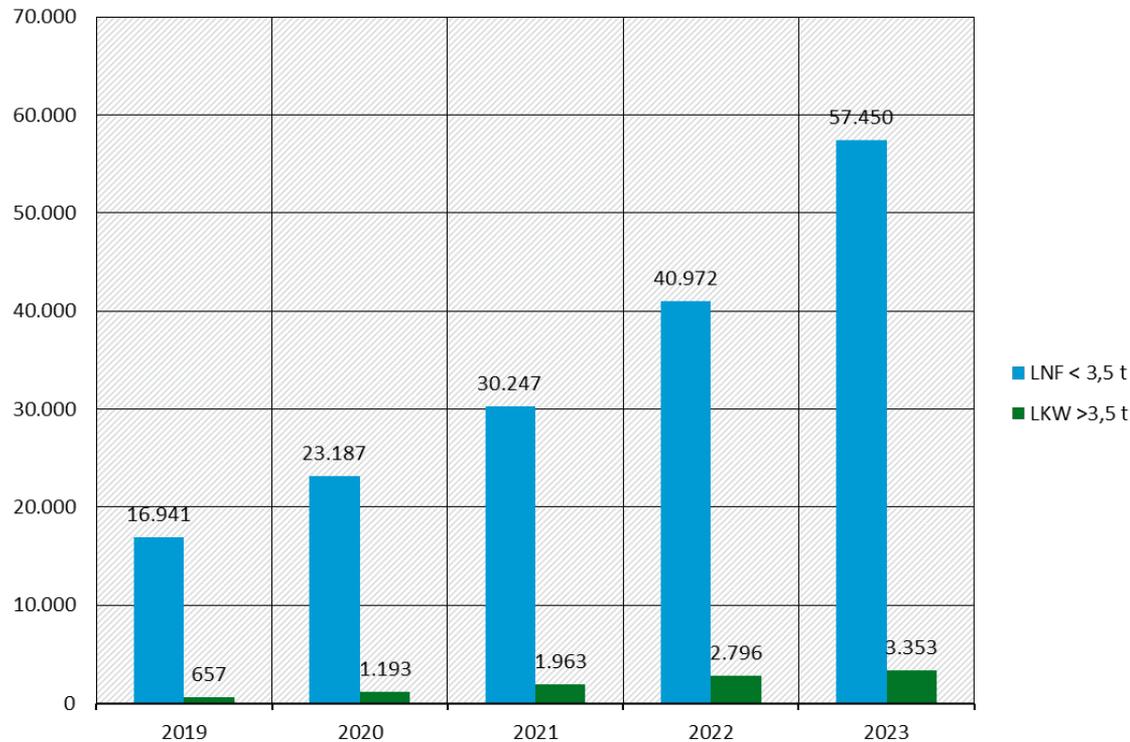
Quelle: eigene Darstellung, ifeu basierend auf TREMOD 6.43 und weiteren Daten.

Anteil Antriebsarten im Jahr 2019 und Annahmen bis 2050

Die dominierende Antriebsart im Straßengüterverkehr im Jahr 2019 war immer noch der - größtenteils mit fossilem Dieselmotorkraftstoff betriebene - Verbrennungsmotor. Von den 119 Mrd. km Fahrleistung wurden nur ca. 0,2 Mrd., also weniger als 1%, elektrisch zurückgelegt, wobei es sich fast ausschließlich um leichte Nutzfahrzeuge handelte.

Die Bestände an Elektrofahrzeugen nahmen jedoch in den letzten Jahren auch bei Lkw zu, auch wenn es sich bisher vor allem um leichte Nutzfahrzeuge und kleinere Lkw handelt (siehe Abbildung 8).

Abbildung 8: Entwicklung des Bestands an rein elektrischen Lkw vom 1.1.2019 bis zum 1.1.2023 in Deutschland



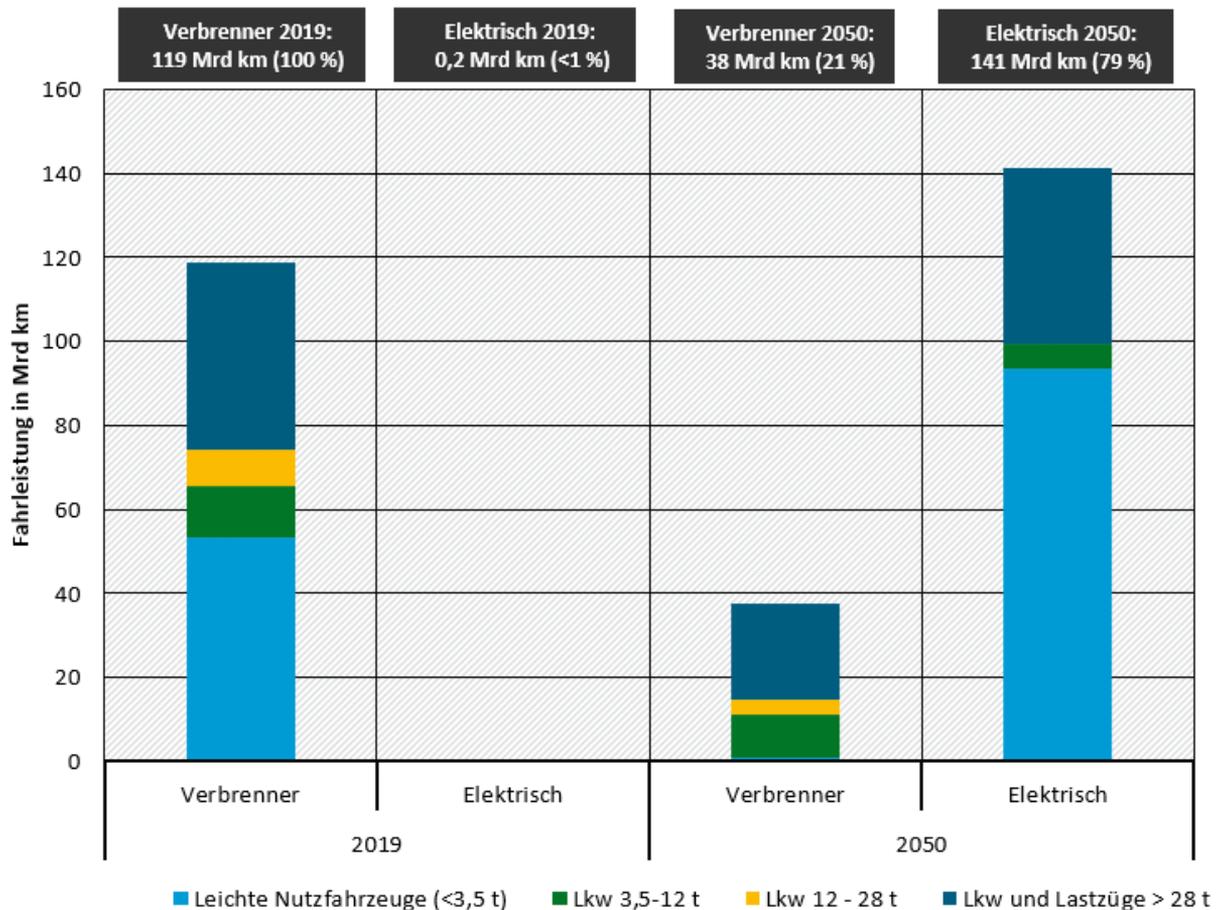
Quelle: eigene Darstellung, ifeu nach KBA. Anmerkung: Aufgrund der geringen Anzahl werden Sattelzugmaschinen nicht in der Abbildung dargestellt (zum 1.1.2023 wurden 72 rein elektrische Sattelzugmaschinen registriert).

Verschiedene Entwicklungen lassen zukünftig jedoch einen weiteren Anstieg von Elektro-Lkw bei allen Größenklassen erwarten.

- ▶ Die europäischen CO₂-Flottengrenzwerte, welche eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 30 % bis 2030 erfordern, dürften dazu führen, dass im Jahr 2030 bis zu ca. 20 % aller Neuzulassungen bei den SNF Nullemissionsfahrzeuge sind, d. h. batterieelektrisch oder mit Wasserstoff betrieben werden, siehe auch (Breed et al. 2021; EU 2019; Repenning et al. 2021). Gegenwärtig wird eine Revision der Grenzwerte diskutiert, wonach ab dem Jahr 2040 90 % aller Lkw CO₂-neutral sein müssten (EU 2023). Bei den leichten Nutzfahrzeugen dürfte die Elektrifizierung deutlich schneller vorangehen, da ab 2035 nur noch Nullemissionsfahrzeuge zugelassen werden dürfen (Bundesregierung 2022).
- ▶ Verschiedene Hersteller haben demgegenüber teils deutliche ambitioniertere ZEV-Anteile an den Neuzulassungen in der Bandbreite von 20 %-60 % für das Jahr 2030 angekündigt (Transport & Environment 2021). Die NOW GmbH prognostiziert 2023 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) (NOW GmbH 2023). Allerdings basieren diese Prognosen auf Ankündigungen, deren Umsetzung auf freiwilliger Basis erfolgt.
- ▶ Die aktuellen Entwicklungen bei den Batteriepreisen lassen erwarten, dass Elektro-Lkw in allen Größenklassen ab dem Jahr 2030 bei den Gesamtkosten (Total Cost of Ownership) günstiger abschneiden als Verbrenner (Jöhrens et al. 2022).

Trotz des angenommenen Hochlaufs von Elektro-Lkw werden bis zum Jahr 2050 immer noch Verbrenner-Lkw im Bestand sein. Insgesamt 21 % der Fahrleistung erfolgen dann noch im Verbrenner-Modus, während 79 % der Fahrleistung im Jahr 2050 elektrisch sein wird und damit deutlich überwiegt (siehe Abbildung 9).

Abbildung 9: Fahrleistungen im Straßengüterverkehr nach Antrieb und Fahrzeugtyp 2019 und 2050 (lt. Trendszenario)



Quelle: eigene Darstellung, ifeu basierend auf TREMOD 6.43.

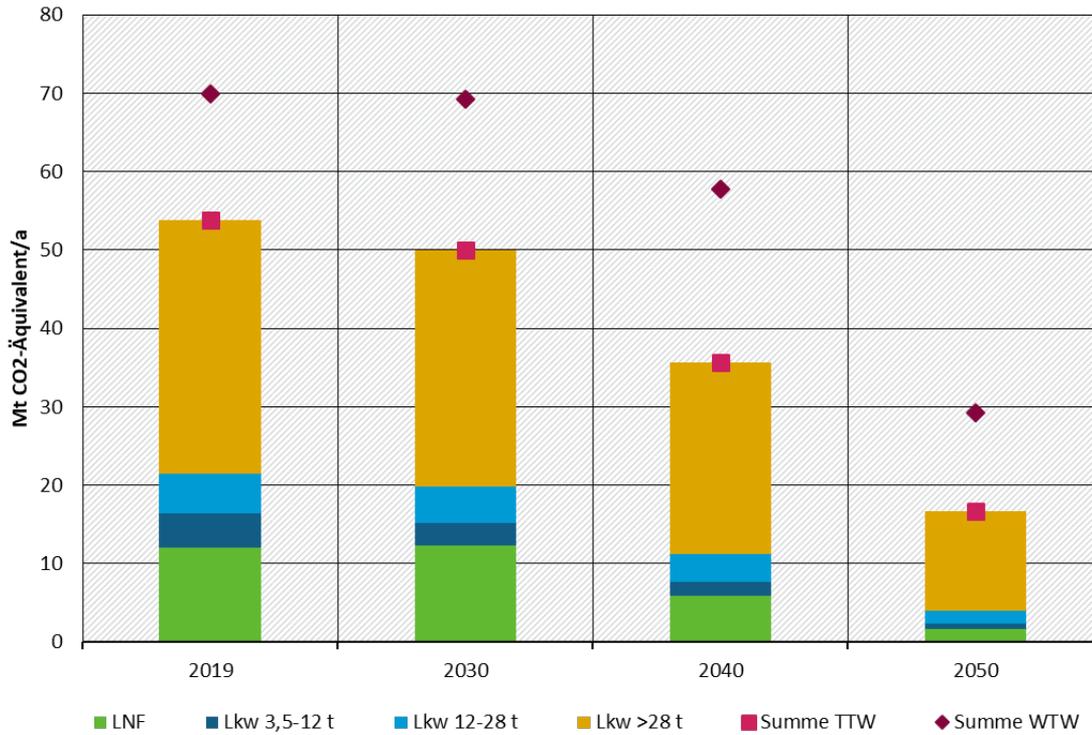
Im Trendszenario wird angenommen, dass THG-neutrale Kraftstoffe, z. B. in Form von Power-to-Liquid, im Straßengüterverkehr nicht zum Einsatz kommen. Der Anteil von Biodiesel steigt geringfügig von ca. 5 % im Jahr 2019 auf ca. 8 % im Jahr 2050.

1.2.2 THG-Emissionen

Abbildung 10 zeigt die THG-Emissionen des nationalen Straßengüterverkehrs im Jahr 2019 sowie deren Entwicklung im Trendszenario für die Jahre 2030, 2040 und 2050. Trotz steigender Fahrleistungen (vgl. voriges Kapitel) nehmen die direkten THG-Emissionen (TTW) vor allem aufgrund des zunehmenden Wechsels von Verbrenner- zu Elektro-Lkw zukünftig ab. Allerdings erfolgt dieser Wechsel in den ersten 10 Jahren sehr langsam, da erst ab dem Jahr 2040 die Neuzulassung von Verbrennern nahezu stoppt. Da die Verbrennerfahrzeuge mehrere Jahre im Einsatz bleiben, stoßen diese selbst im Jahr 2050 noch fast 18 Mio. t CO_{2e} aus. Den Hauptanteil davon emittieren die schweren Lkw mit über 28 t, welche vor allem im Fernverkehr eingesetzt werden. Inklusive der Emissionen für die Energiebereitstellung (WTW), z. B. aus Gas- und Kohlekraftwerken für die Produktion des Stroms für Elektrofahrzeuge, sind die Emissionen

deutlich höher, als die direkten Emissionen des Straßengüterverkehrs und nehmen auch langsamer ab.

Abbildung 10: THG-Emissionen des Straßengüterverkehrs von 2019 bis 2050 im Trendszenario tank-to-wheel und well-to-wheel



Quelle: eigene Darstellung, ifeu, Daten aus TREMOD 6.43. Anmerkung: THG-Emissionen TTW bezogen auf das Energiebilanzprinzip (Energieabsatz) und ohne Berücksichtigung der Energievorkette, Berechnung der CO₂-Äquivalente nach AR5. THG-Emissionen WTW inklusive der Energievorkette.

1.2.3 Luftschadstoffe

Luftbelastung durch den Verkehr

Die Häufigkeit der Überschreitung von Luftqualitätsgrenzwerten nahm in den letzten Jahren in Deutschland stetig ab. Wurde im Jahr 2010 der Jahresmittelgrenzwert für Stickstoffdioxid (NO₂) von 40 µg/m³ noch an über 80 % aller Messstationen überschritten, so waren es im Jahr 2019 noch 20 %. Diese Überschreitungen fanden ausschließlich an verkehrsnahen städtischen Messstationen statt. Laut Daten des UBA für das Jahr 2021 verursachte der Straßengüterverkehr ca. 30% der Emissionen des Stadtverkehrs, während Diesel-Pkw mit ca. 62 % den größten Anteil an den Stickoxidemissionen hatten (UBA 2023b).

In Bezug auf Feinstaub (PM10 und PM2,5) sind anders als bei NO₂ neben dem Straßenverkehr mehrere weitere Quellen wie z. B. die Energiewirtschaft, Holzfeuerung oder Schüttgutumschläge relevant. Die aktuell gültigen Luftqualitätsgrenzwerte für PM10 und PM2,5 wurden in Deutschland seit 2018 nicht mehr überschritten (UBA 2023b). Die europäischen Luftreinhalteziele werden somit aktuell erreicht.

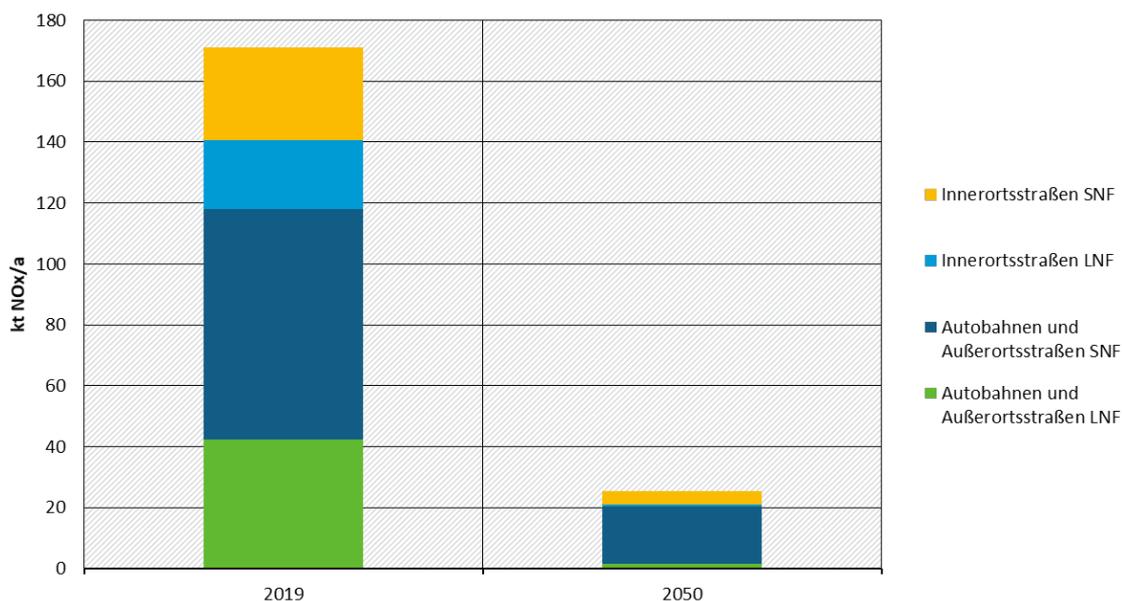
Seit Jahren werden jedoch Verschärfungen der europäischen Luftqualitätsgrenzwerte diskutiert, da die Weltgesundheitsorganisation niedrigere zulässige Jahresmittelwerte für PM2,5, PM10, NO₂ und Ozon empfiehlt. Laut dem UBA wurden die Richtwerte der WHO im Jahr 2022 an fast allen (PM2,5) bzw. an 80 % (NO₂) der Messstationen in Deutschland überschritten (UBA 2023b).

Die EU-Kommission legte daher im Oktober 2022 einen Entwurf für eine Revision der Luftqualitätsgrenzwerte vor, welcher sich für das Jahr 2030 den WHO-Richtwerten annähern und spätestens bis zum Jahr 2050 den Pfad in eine Null-Emissionsgesellschaft ebnen soll (EU 2022). Daher sind weitere Reduktionen der Luftschadstoffemissionen im Verkehr nötig.

Zukünftige Entwicklung der Schadstoffemissionen

Die spezifischen Schadstoffemissionen von Lkw sind seit den 1990er-Jahren bis heute deutlich gesunken (UBA 2023c). Mit zunehmendem Ausscheiden älterer Fahrzeuge und dem Einsatz von Lkw der neusten Euro 6/VI-Norm einerseits sowie dem Ersatz von Verbrenner- durch Elektro-Lkw andererseits wird sich dieser Trend fortsetzen. Stieß der Straßengüterverkehr im Jahr 2019 deutschlandweit noch ca. 170 Kilotonnen Stickstoffoxide aus (Abbildung 11) aus, so nehmen diese im Trendszenario bis 2050 um ca. 85 % ab. Auf Innerortsstraßen sind die Minderungen besonders groß, da hier der Anteil von Elektrofahrzeugen größer ist als auf Autobahnen und sonstigen Außerortsstraßen.

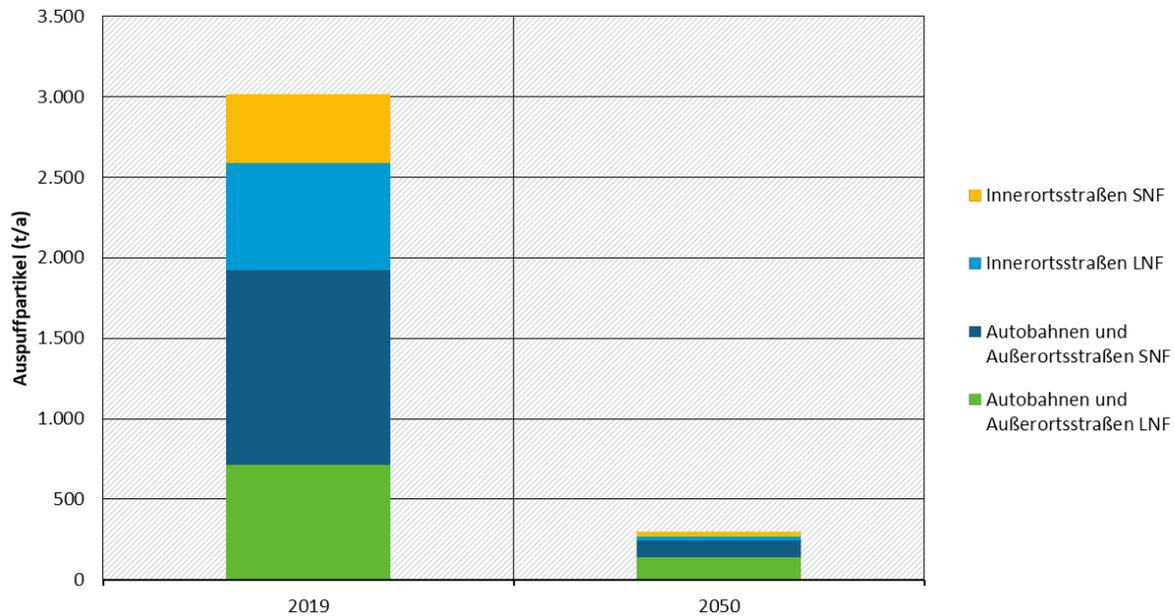
Abbildung 11: Direkte Stickoxid-Emissionen des Straßengüterverkehrs in Deutschland 2019 und 2050



Quelle: eigene Darstellung, ifeu, Daten aus TREMOD 6.43

Bei den Partikelemissionen reduzieren sich die Emissionen in ähnlichem Umfang (Abbildung 12). Hierbei ist jedoch zu beachten, dass in der Abbildung nur die Auspuffpartikel dargestellt sind und Partikel aus Brems-, Reifen- und Straßenabrieb nach Daten des UBA den Hauptteil der PM10-Emissionen des Straßenverkehrs insgesamt im Jahr 2019 ausmachten (etwa 12 von 19 Kilotonnen im Jahr 2019 nach (EEA 2023)). Spezifische Daten für die Abriebemissionen des Straßengüterverkehrs wurden im Rahmen des Berichts nicht ermittelt.

Abbildung 12: Direkte (Auspuff-)Partikel-Emissionen des Straßengüterverkehrs in Deutschland 2019 und 2050



Quelle: eigene Darstellung, ifeu, Daten aus TREMOD 6.43

Der Straßengüterverkehr emittiert damit im Jahr 2050 sowohl NO_x als auch Partikel. Das vorgeschlagene Nullemissions-Ziel der EU-Kommission bis 2050 wird daher nicht erreicht.

Die gezeigten Ergebnisse berücksichtigen keine weitere Verschärfung der Abgasnormen für Lkw über die bestehende Euro 6/VI-Norm hinaus. Eine solche Verschärfung beinhaltet der im November 2022 von der EU-Kommission vorgelegte Entwurf für die Norm Euro 7. Allerdings sind deren konkrete Ausgestaltung und Einführung noch Teil von Verhandlungen. Würde die Euro 7-Norm in der vorgeschlagenen Form in Kraft treten, könnten die Luftschadstoffemissionen von Verbrennern zukünftig noch stärker reduziert werden, wie Berechnungen im Rahmen von (Allekotte et al. 2023) zeigen.

1.2.4 Sonstige Emissionen

Der Straßenverkehr ist eine der Hauptquellen für **Lärmbelastung** in Deutschland. Das Umweltbundesamt ermittelte in einer repräsentativen Umfrage mit rund 2.000 Personen zum „Umweltbewusstsein in Deutschland 2020“, dass etwa $\frac{3}{4}$ der Bevölkerung sich durch Straßenverkehrslärm gestört oder belästigt fühlt. Lärmkartierungen im Rahmen der EU-Umgebungslärmrichtlinie und weitere Berechnungen des UBA ergaben, dass „etwa die Hälfte der bundesdeutschen Bevölkerung Straßenverkehrslärm mit Mittelungspegeln von mindestens 55 dB(A) tags beziehungsweise 45 dB(A) nachts ausgesetzt“ bzw. ca. „15 Prozent sogar mit Pegeln von mindestens 65 dB(A) tags beziehungsweise 55 dB(A) nachts belastet“ werden. Untersuchungen von (Steven 2005) zeigen jedoch, dass die Lärmemissionen von schweren Nutzfahrzeugen bereits bei geringen Geschwindigkeiten ab 20 km/h (wie sie z. B. im Innerortsverkehr auftreten) deutlich über 75 dB(A) liegen können, während es bei Pkw nur 63 dB(A) sind.

Weiterhin trägt der Straßenverkehr durch die im vorigen Kapitel genannten Reifen-, Brems- und Straßenabriebemissionen nicht nur zur Luft- sondern auch zur **Gewässerbelastung mit Mikroplastik** bei. Laut UBA gelangen alleine durch Reifenabrieb jährlich ca. 110 Kilotonnen Mikroplastik in die Umwelt (UBA 2023c). Zu ähnlichen Ergebnissen kommt eine Studie des

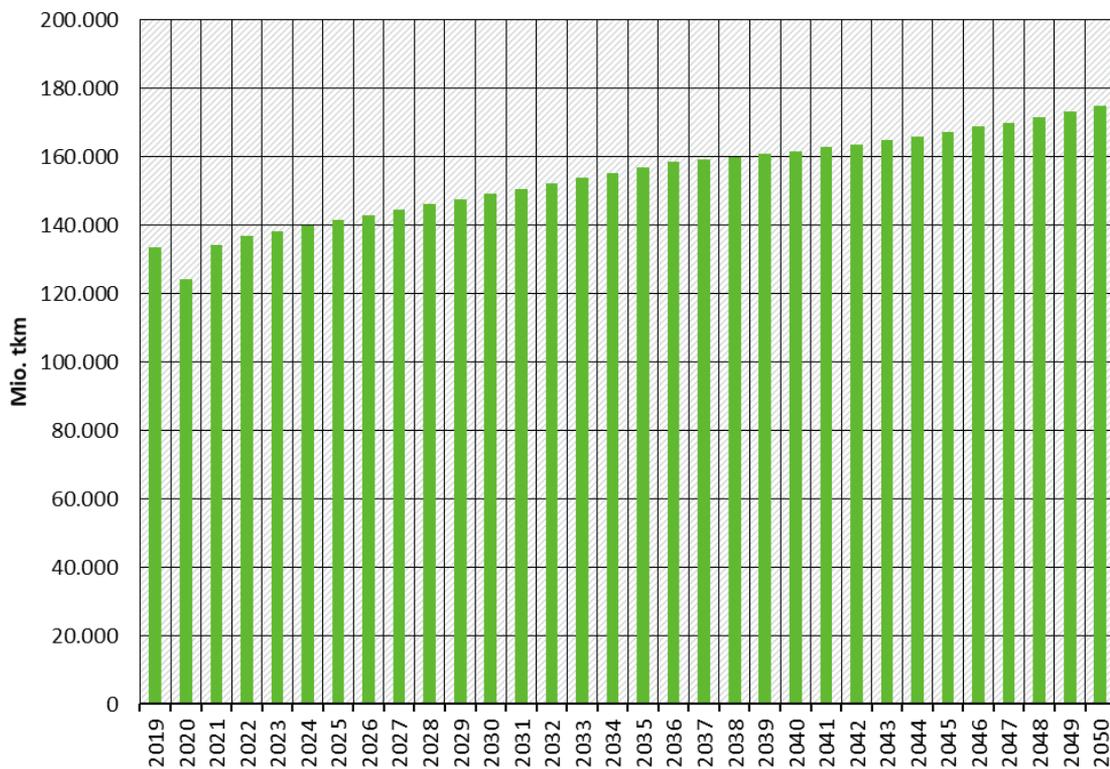
Fraunhofer Umsicht, nach der der Verkehr in Deutschland jährlich 1229 g/Kopf bzw. ca. 100 Kilotonnen Abriebemissionen verursacht, was ca. 30% der Mikroplastikemissionen aller dort untersuchten Quellen entspricht. Hiervon stammen aber nur 89 g/Kopf bzw. 7 Kilotonnen von Lkw und der Großteil der Emissionen daher von Pkw (Juergen Bertling et al. 2018).

1.3 Schienengüterverkehr

1.3.1 Verkehrsmengen und Flottenmix

Im Schienengüterverkehr wurden im Jahr 2019 vor allem Massengüter transportiert, besonders wichtig ist der Schienengütertransport bei Kohletransporten sowie Erztransporten. Insgesamt nimmt jedoch der Güterverkehr nach der gleitenden Langfristprognose (GLP) 2023 stark zu, so dass auch der Schienengüterverkehr weiterhin wachsende Verkehrsleistungen (+33% bis 2015 gegenüber dem Basisjahr 2019) verzeichnet. Durch den Wegfall der Transporte an fossilen Brennstoffen und die Verschiebung hin zu Stückguttransporten, verzeichnet der Schienengüterverkehr jedoch Rückgänge beim Modal Split gegenüber dem Straßenverkehr.

Abbildung 13: Verkehrsleistungen des Schienengüterverkehrs von 2019 bis 2050 im Trendszenario



Quelle: eigene Darstellung, ifeu, aus TREMOD 6.43 Trendszenario (basierend auf der gleitenden Langfristprognose)

Waren im Jahr 1990 noch über 90 % der Gütertransporte auf der Schiene von der DB AG, sank dieser Anteil kontinuierlich ab, so dass im Jahr 2019 die Mehrheit (über 50 %) der Verkehrsleistungen von anderen Eisenbahnunternehmen erbracht wird.

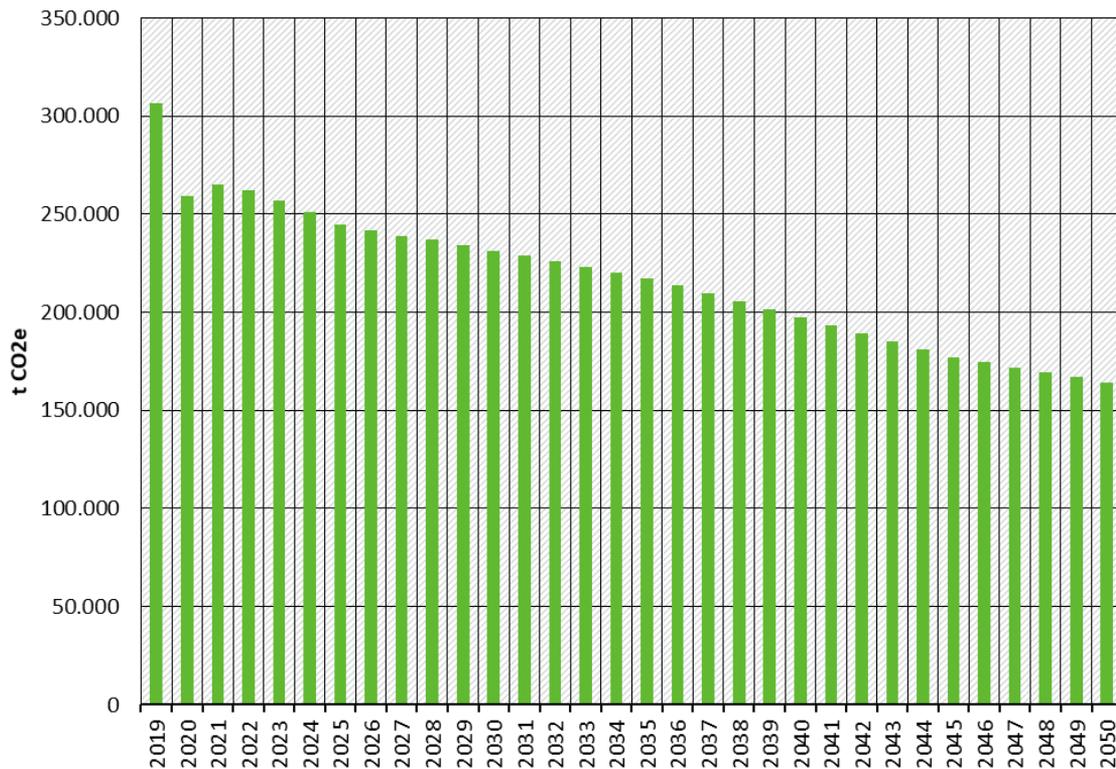
1.3.2 THG-Emissionen

Im Jahr 1990 wurde noch fast ein Drittel des Schienengüterverkehrs mit Dieseltraktion erbracht, dieser Anteil ist seither kontinuierlich gesunken und lag im Jahr 2019 bei nur noch 5,7%. Damit

sind Schienengüterverkehr und Binnenschiff die Güterverkehrsmittel mit den geringsten THG-Emissionen in Deutschland. Im TREMOD Trendszenario sinkt der Anteil der Dieseltraktion weiter, so dass im Jahr 2050 nur noch 2,4 % der Verkehrsleistung im Güterverkehr mit Diesel erbracht wird.

Damit gehen trotz der steigenden Verkehrsleistung stetig sinkende Treibhausgasemissionen des Schienengüterverkehrs einher, insbesondere wenn wie im KSG nur die direkten Emissionen im Verkehrssektor betrachtet werden.

Abbildung 14: Treibhausgasemissionen des Schienengüterverkehrs von 2019 bis 2050 im Trendszenario (TTW)



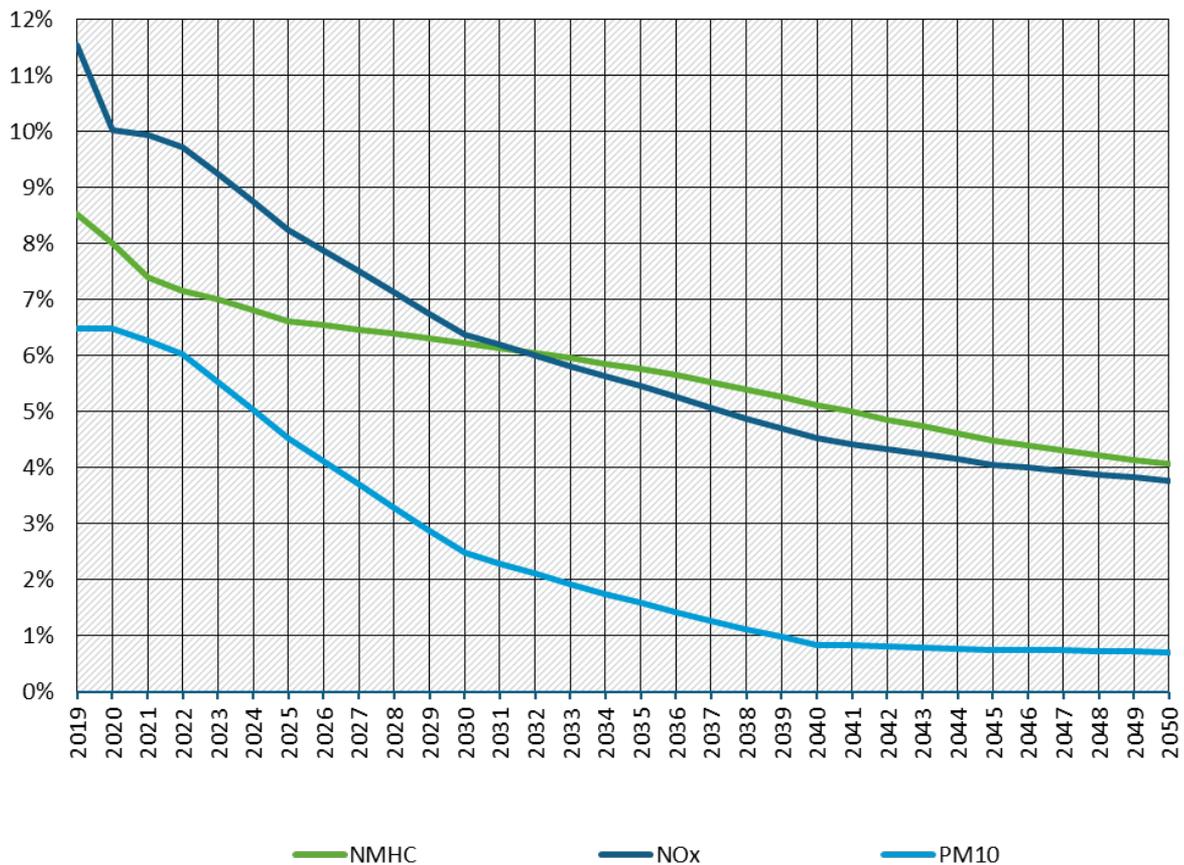
Quelle: eigene Darstellung, ifeu. TREMOD 6.43. Anmerkung: THG-Emissionen TTW bezogen auf das Energiebilanzprinzip (Energieabsatz) und ohne Berücksichtigung der Energievorkette, Berechnung der CO₂-Äquivalente nach AR5.

Die verbleibenden Emissionen aus der Dieseltraktion können weitestgehend vermieden werden, wenn im Schienengüterverkehr auf nachhaltigen, reststoffbasierten Dieselkraftstoff oder auf synthetischen Diesel aus erneuerbarem Strom umgestellt wird. Eine derartige Entwicklung ist im aktuellen TREMOD Trendszenario jedoch noch nicht vorgesehen, hier wird synthetischer Kraftstoff bisher lediglich im Luftverkehr eingesetzt.

1.3.3 Luftschadstoffe

Auch die Luftschadstoffemissionen im Schienengüterverkehr sind auf die Nutzung von Diesel zurückzuführen. Zusätzlich werden auch im Schienengüterverkehr die Diesel-Loks im Laufe der Zeit durch neuere ausgetauscht, welche strengere Abgasgrenzwerte einhalten, so dass deren Emissionen zurückgehen (gezeigt in Abbildung 15).

Abbildung 15: Luftschadstoffemissionen des Schienengüterverkehrs mit Dieseltraktion 2019 bis 2050 im Trendszenario im Vergleich zum Basisjahr 1990



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Anmerkung: Im Basisjahr 1990 lagen die Schadstoffemissionen von NMHC bei 2.757 t, von NO_x bei 29.628 t, von PM10 bei 960 t und von SO₂ (hier nicht dargestellt) bei 4.724 t.

Durch den Einsatz von schwefelfreien Dieselkraftstoffen spielen Schwefeldioxidemissionen bereits heute keine Rolle mehr, auch die weiteren Luftschadstoffemissionen wie NO_x, NMHC sowie PM10 liegen bereits 2019 bei nur noch bei 12,5 bis 6,5% gegenüber 1990 und werden in Zukunft weiter absinken.

1.3.4 Sonstige Emissionen

Im Bereich der sonstigen Wirkungen des Schienengüterverkehrs ist vor allem die Lärmbelastung zu nennen. Obwohl von den untersuchten Lärmquellen im Verkehr der Schienengüterverkehr für die geringsten Lärmbelastungen sorgt, fühlen sich dennoch 34 % der Deutschen zumindest etwas durch Schienenverkehrslärm belästigt (UBA 2022b).

Nach dem Lärm-Monitoring des Eisenbahn-Bundesamtes sind vor allem Güterzüge für die Lärmbelastungen verantwortlich, obwohl die Schallemissionen des Schienengüterverkehrs in den letzten Jahren deutlich rückläufig sind. Dies ist vor allem auf den verstärkten Einsatz von lärmarmen Güterwagen mit geräuschreduzierenden Verbundbremssohlen anstelle der vorher üblichen Graugussbremssohlen zurückzuführen. Durch den schrittweisen Austausch alter Güterwagen bzw. die Umrüstung bestehender Waggons sowie das Verbot von besonders lauten Güterwagen wird sich dieser Trend in den nächsten Jahren fortsetzen (Eisenbahn-Bundesamt

2022). Weitere Lärminderungspotenziale ergeben sich durch den Einsatz von leisen Güterzuglokomotiven, wie sie in der Schweiz bereits teilweise erfolgen (Hanisch et al. 2023).

1.4 Binnenschifffahrt

1.4.1 Verkehrsmengen und Flottenzusammensetzung

Im Jahr 2019 erbrachte die Binnenschifffahrt in Deutschland eine Verkehrsleistung von 50,9 Mrd. tkm, d. h. ca. 7,5 % der Verkehrsleistung aller inländischen Güterverkehre. Die Binnenschifffahrt transportiert in erster Linie Massengüter wie z. B. Kohle, Mineralöl- und chemische Erzeugnisse, Erze, Baumaterialien sowie Getreide und Nahrungsmittel. Dies äußert sich auch in der Zusammensetzung nach Ladungsarten (Tabelle 2), wonach Massengüter im Jahr 2019 insgesamt 80% der Verkehrsleistung ausmachten, wobei 55% der Massengüter festes Schüttgut und 25% flüssiges Massengut waren.

Tabelle 2: Tragfähigkeit und Ladung der Binnenschiffe

Tragfähigkeitsklasse und Ladungsart	<1500 t	1500-3000 t	> 3000 t	Anteil Ladungsart
Container	0,1	1,6	4,1	11%
Festes Schüttgut	8,5	11,0	8,4	55%
Flüssiges Massengut	2,1	8,0	2,8	25%
Sonstige	1,1	1,9	1,3	9%
Anteil Tragfähigkeitsklassen	23%	44%	33%	100% (50,9 Mrd. tkm)

Quelle: TREMOD 6.43

Verglichen mit Lkw und Bahn hat ein Binnenschiff eine deutlich höhere Ladekapazität, welche im Fall der Binnenschifffahrt als Tragfähigkeit bezeichnet wird. 33% der Verkehrsleistungen wurde auf Schiffen mit mehr als 3.000 Tonnen Tragfähigkeit erbracht, 44% mit 1.500-3.000 Tonnen und nur 23% von Schiffen mit weniger 1.500 Tonnen. Die tatsächliche Beladung hängt neben der Verfügbarkeit von Fracht auch stark vom Wasserstand ab. Nach Berechnungen mit dem Modell TREMOD lag die durchschnittliche Beladung im Jahr 2019 bei 1.046 Tonnen, d. h. die durchschnittliche Auslastung der Tragfähigkeit lag inklusive Leerfahrten bei 50%.

In Deutschland selbst waren im Jahr 2019, laut der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, ca. 2.000 Frachtschiffe sowie 240 Schubboote registriert. Eine deutlich höhere Anzahl von Schiffen fährt unter niederländischer Flagge. Schiffe unter deutscher Flagge machten etwa ein Drittel der Verkehrsleistung auf deutschen Wasserstraßen aus. Bei den Hauptverkehrsbeziehungen waren ca. 20% der Verkehrsleistung reiner Binnenverkehr und die restlichen Verkehre grenzüberschreitend.

In der GLP des BMDV werden für die Binnenschifffahrt nur noch geringe Zuwächse angenommen, da zukünftig vermehrt Güter transportiert werden müssen, welche bisher auf der Straße transportiert werden, z. B. Stückgüter. Für das Jahr 2050 wird dementsprechend eine Verkehrsleistung von 51,6 Mrd. tkm angenommen.

1.4.2 THG-Emissionen

Die THG-Emissionen der Güterbinnenschifffahrt betragen im Jahr 2019 nach Abgrenzung des KSG ca. 0,8 Mio. t CO_{2e} und damit nur ca. 1,5% der THG-Emissionen des Güterverkehrs im Inland. Im Vergleich mit dem Anteil der Verkehrsleistung von ca. 7,5% ist der Anteil an den THG-Emissionen somit unterproportional. Dies liegt zum einen daran, dass Binnenschiffe aufgrund ihrer Energieeffizienz durchschnittlich eine deutlich geringere THG-Intensität pro Tonnenkilometer haben als der Straßengüterverkehr (Allekotte et al. 2020). Zum anderen weist die nationale Energiebilanz, welche dem KSG zugrunde liegt, deutlich geringere Absatzmengen an Diesel für die Binnenschifffahrt aus, als mit dem Modell TREMOD auf Basis der Verkehrsmengen berechnet werden (Allekotte et al. 2024). Im Jahr 2019 waren die Absatzmengen um ca. 33% geringer als die mit TREMOD berechneten Verbräuche. Ein wahrscheinlicher Grund für die Differenz könnte sein, dass bei den grenzüberschreitenden Verkehren mehr Kraftstoff im Ausland getankt wird und in Deutschland verbraucht wird als umgekehrt.

Im TREMOD Trendszenario sinken die THG-Emissionen der Binnenschifffahrt zukünftig wie Tabelle 3 verdeutlicht. Dabei wird angenommen, dass der spezifische Energiebedarf aufgrund von Verbesserungen beim Dieselantrieb, Schiffshülle, Propeller und betrieblichen Optimierungen an den Schiffen jährlich um ca. 1% sinkt. Elektro- oder Brennstoffzellenantriebe und erneuerbare Kraftstoffe werden im TREMOD-Trendszenario für die Binnenschifffahrt bisher nicht angenommen. Als alternativer Kraftstoff wird lediglich LNG angenommen, welches jedoch weniger als 1% am Energieverbrauch der Binnenschifffahrt im Jahr 2050 ausmacht. Demnach stehen die THG-Emissionen der Binnenschifffahrt der von der Bundesregierung beschlossenen THG-Neutralität im Jahr 2045 entgegen, machen jedoch verglichen mit dem Straßengüterverkehr nur einen marginalen Anteil an den Emissionen aus.

Tabelle 3: THG-Emissionen der Binnenschifffahrt in Deutschland nach KSG-Abgrenzung (tank-to-wheel) im Jahr 2019 und im Trendszenario bis 2050

Jahr	Mio. t CO _{2e}	Änderung zu 2019
2019	0,84	
2030	0,63	-25%
2040	0,59	-29%
2050	0,56	-33%

Quelle: TREMOD 6.43. Anmerkung: THG-Emissionen bezogen auf das Energiebilanzprinzip (Energieabsatz) und ohne Berücksichtigung der Energievorkette, Berechnung der CO₂-Äquivalente nach AR5.

1.4.3 Luftschadstoffe

Die Luftschadstoffemissionen der Binnenschifffahrt in Deutschland sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Binnenschifffahrt emittierte im Jahr 2019 deutlich weniger Luftschadstoffe als der Straßengüterverkehr. Allerdings ist anders als bei den THG-Emissionen der Anteil der Binnenschifffahrt an den Luftschadstoffen höher als an der Verkehrsleistung, da die für Binnenschiffsmotoren geltenden Grenzwerte deutlich hinter dem Ambitionsniveau der Emissionsgrenzwerte für Lkw zurückliegen (vgl. z. B. (Heidt et al. 2023)). Außerdem sind Binnenschiffsmotoren zum Teil über Jahrzehnte im Einsatz, bevor sie ausgetauscht werden. Dennoch konnten in bisherigen Untersuchungen nur in seltenen Fällen erhöhter Luftbelastungen durch Binnenschiffe nachgewiesen werden. Zwar können die Emissionen an

stark befahrenen Wasserstraßen erhöht sein, doch diese verdünnen sich mit zunehmender Distanz von der Fahrrinne so stark, dass selbst in Städten wie Duisburg oder Düsseldorf der Straßenverkehr deutlich stärker zur lokalen Belastung mit Feinstaub (PM₁₀) und Stickstoffdioxiden (NO₂) beiträgt als die Binnenschifffahrt (vgl. (Heidt et al. 2023)). Zudem bewirkt der Austausch mit neueren schadstoffärmeren Motoren, dass die Emissionen der Binnenschifffahrt im Trendszenario trotz nahezu konstanter Verkehrsmengen deutlich sinken (Tabelle 4).

Tabelle 4: NO_x- und Partikelemissionen der Binnenschifffahrt in Deutschland (tank-to-wheel) im Jahr 2019 und im Trendszenario bis 2050

Jahr	Tonnen Stickstoffoxide (NO _x)	Änderung zu 2019	Tonnen Auspuffpartikel (PM)	Änderung zu 2019
2019	19.089		411	
2030	11.203	-41%	224	-46%
2040	6.831	-64%	115	-72%
2050	4.907	-74%	68	-83%

Quelle: TREMOD 6.43. Anmerkung: Emissionen bezogen auf das Inlandsprinzip (Territorial) und ohne Berücksichtigung der Energievorkette. Partikelmasse ohne Abriebe und Aufwirbelung

1.4.4 Sonstige Emissionen

Die Nutzung der Flüsse als Wasserstraßen steht unter anderem in Konkurrenz zu deren Funktion als Ökosystem. Der BUND weist darauf hin, dass die Binnenschifffahrt durch die „erheblichen Eingriffe in den Wasser- und Naturhaushalt [...] durch Staustufen, Begradigungen und Uferbefestigung“ die Flussökosysteme und Artenvielfalt stark beeinträchtigt und fordert daher einen Ausbaustopp der Wasserstraßen (Rosenkranz et al. 2001).

1.5 Seeverkehr

Dieses Kapitel beschreibt die Verkehrsmengen sowie die Umweltwirkungen des Seeverkehrs. Bei der Abgrenzung der Emissionen des Seeverkehrs wurde das Ziel verfolgt, alle Emissionen, die durch ökonomische Aktivitäten im Inland verursacht werden, d. h. die mit deutschen Im- bzw. Exporten in Verbindung stehen, zu erfassen. Daher wurden die Seeschifffahrtsemissionen unabhängig vom Start- bzw. Zielhafen berücksichtigt, sofern die Transportkette ihren Ursprung oder ihr Ziel in Deutschland hat. Dies bedeutet auch, dass die Seeschifffahrtsemissionen von Waren, die zwar an deutschen Häfen umgeschlagen wurden, aber nicht von Deutschland im- oder exportiert wurden, unberücksichtigt bleiben. Von den auf diese Weise berechneten Emissionen wird Deutschland die Hälfte zugeordnet².

1.5.1 Güteraufkommen und Verkehrsleistung

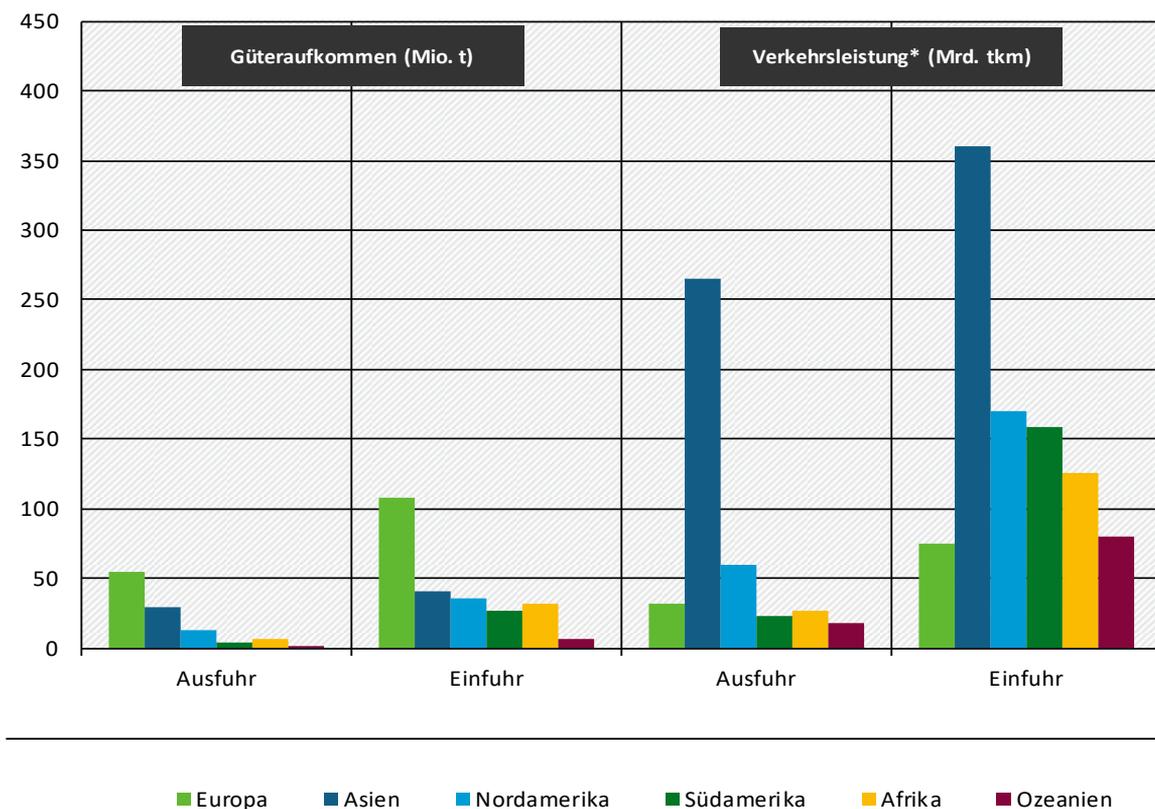
Das gesamte Güteraufkommen der Seeschifffahrt betrug im Jahr 2019 357 Mio. t. Hierbei ist der große Unterschied zwischen Ein- und Ausfuhr hervorzuheben. Während Deutschland 249 Mio. t Güter auf dem Seeweg importierte, wurden nur 108 Mio. t. exportiert. Dies widerspricht nicht

² Die Bilanzgrenzen wurden so gewählt, dass die Emissionen jeweils zur Hälfte dem Export- und dem Importstaat zugeordnet werden. Somit werden im Folgenden die Hälfte der gesamten Seeschifffahrtsemissionen, welche mit deutschen Im- und Exporten in Verbindung stehen, berichtet.

dem hohen deutschen Exportüberschuss gemessen am Wert³, denn Kohle und Öl, die in Relation zu ihrem Gewicht recht günstig sind⁴, machen einen großen Anteil an den Importen aus. Dasselbe Ungleichgewicht zeigt sich in der Verkehrsleistung, welche 2019 968 Mrd. Tonnenkilometer (Einfuhr) bzw. 425 Mrd. Tonnenkilometer (Ausfuhr) betrug. Entsprechend der Bilanzgrenzen für die Emissionen entsprechen die in diesem Kapitel gegebenen Verkehrsleistungen der Hälfte des Gesamtwerts.

Abbildung 16 zeigt das Güteraufkommen und die Verkehrsleistung des Seeverkehrs nach Ursprungs- bzw. Zielkontinent im Jahr 2019. Mengenmäßig dominiert der innereuropäische Handel den Seeschiffverkehr, wohingegen er hinsichtlich der Verkehrsleistung relativ unbedeutend ist, was auf die geringen Distanzen zurückzuführen ist. Bezogen auf die Verkehrsleistung sind Transporte von und nach Asien am bedeutendsten für die Seeschifffahrt.

Abbildung 16: Güteraufkommen und Verkehrsleistung des Seeschiffsverkehrs nach Ursprungs-/Zielkontinent im Jahr 2019 (deutsche Im- und Exporte)



* Entsprechend der im Bericht verwendeten Bilanzgrenze ist hier die Hälfte der gesamten Verkehrsleistung dargestellt.

Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Für das Jahr 2050 wird prognostiziert, dass die Export-Transportleistung leicht auf 441 Mrd. tkm ansteigt, während die Import-Transportleistung auf 781 Mrd. tkm zurückgeht. Diese gegensätzliche Entwicklung erklärt sich durch den deutlich höheren Anteil der Stückgüter an

³ Laut DESTATIS exportierte Deutschland im Jahr 2019 Waren im Wert von 1,33 Bio. €, während der Wert der Importe 1,10 Bio. € betrug (DESTATIS 2023a).

⁴ Laut Außenhandelsstatistik betrug im Jahr 2019 der Anteil der mineralischen Brennstoffe und Mineralöle (Kapitel 27 des Warenverzeichnisses Außenhandelsstatistik) an den gesamten deutschen Importen 47% (bezogen auf das Gewicht). Ihr Wert lag im Mittel bei 327 €/t, während das durchschnittliche im- bzw. exportierte Gut einen Wert von 2239 €/t hatte (DESTATIS 2023b).

den Exporten als an den Importen. Während das Güteraufkommen von Massengütern stark abnehmen wird, wird das Güteraufkommen von Stückgütern bis 2050 steigen (Intraplan/Trimode 2023).

1.5.2 THG-Emissionen

Tabelle 5 zeigt die gesamten auf Deutschland entfallenden Treibhausgasemissionen der Seeschifffahrt im Jahr 2019 sowie in der Prognose für 2050, sowohl inklusive als auch exklusive der Vorketten. Für den Zeitraum von 2019 bis 2050 wird ein Rückgang der THG-Emissionen um 41 % prognostiziert. Diese Verringerung liegt einerseits in der sinkenden Transportleistung und andererseits in verringerten THG-Emissionen der Schiffe (z.B. durch Effizienzgewinne) begründet. Für das Jahr 2019 wurden nur Schiffe mit konventionellem Antrieb betrachtet. Um mögliche Verbesserungen bei den THG-Emissionen der Seeschiffe bis 2050 abzubilden, wurden die Emissionsfaktoren gemäß der IMO-THG-Studie (Faber et al. 2021) pauschal um 25 % reduziert. Obwohl die Prognose der IMO-THG-Studie sich nur auf direkte CO₂-Emissionen bezieht, wird dieser Rückgang vereinfachend auf die TTW- und WTW-Treibhausgasemissionen der Seeschiffe angewandt. Die IMO-Studie spezifiziert dabei nicht genau, durch welche Maßnahmen diese Minderungen erreicht werden und welchen Anteil daran Seeschiffe mit alternativen Antrieben (z. B. LNG oder Methanol) haben. Dadurch kommt es zu gewissen Unsicherheiten bei den THG-Emissionen, da es Unterschiede zwischen den verschiedenen Antriebsarten z. B. beim Methanschluß oder der Kraftstoffbereitstellung gibt.⁵

Tabelle 5: Auf Deutschland entfallende THG-Emissionen der Seeschifffahrt (in Mio. t CO_{2e})

Bilanzgrenzen	2019	2050
TTW	9,6	5,7
WTW	11,1	6,6

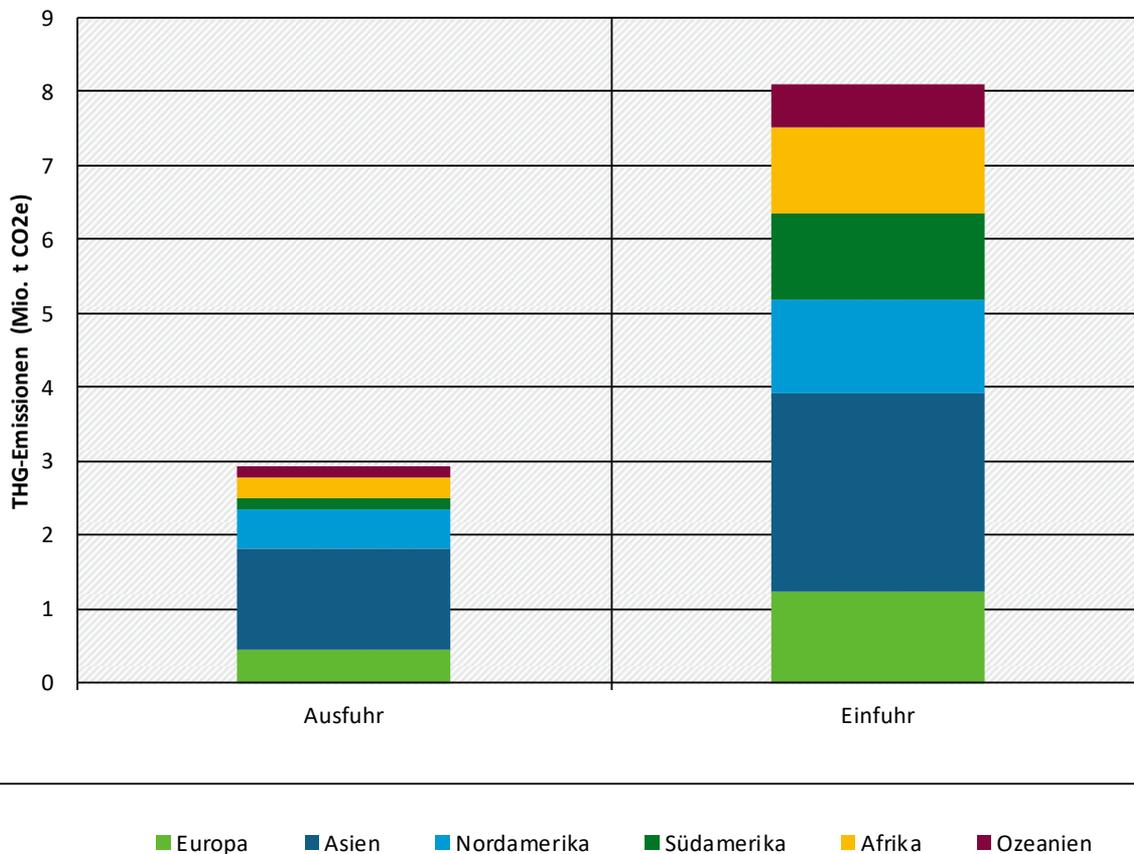
Quelle: ifeu-Berechnung auf Basis von (Anthes et al. 2022; DESTATIS 2023c; b; Faber et al. 2021; Intraplan/Trimode 2023). Anmerkung: Die angegebenen Werte basieren auf einem Tank-to-Wheel- (TTW) bzw. Well-to-Wheel-Ansatz (WTW). Emissionen werden nach Quell-Ziel-Prinzip zugerechnet, d. h. jeweils 50 % aller deutschen Im- und Exporte auf Deutschland (unabhängig vom Land des verwendeten Seehafens).

Die hier für 2019 berichteten THG-Emissionen (9,6 Mio. t CO_{2e}) sind deutlich höher als der im nationalen Inventarbericht angegebene Wert von 3,5 Mio. t CO_{2e} (UBA 2021b). Dies liegt an den unterschiedlichen Bilanzgrenzen: Während in diesem Projekt alle deutschen Ex- und Importe unabhängig von Land des verwendeten Seehafens betrachtet werden, bezieht sich der nationale Inventarbericht nur auf die Kraftstoffabsätze in deutschen Seehäfen. Hierbei ist neben den unterschiedlichen Bilanzgrenzen zu beachten, dass die Kraftstoffabsätze nur bedingt mit der Aktivität der Schiffe korrelieren, da Seeschiffe nicht bei jedem Hafenaufenthalt Kraftstoff bunkern müssen, was u. a. aufgrund von starken Preisunterschieden zu Verzerrungen der Statistik führt (UBA 2021b).

Abbildung 17 stellt die Aufteilung der THG-Emissionen der Seeschifffahrt nach Aus- und Einfuhr sowie Ziel- und Ursprungskontinenten dar. Es ist zu erkennen, dass die Seeschifffahrt von und nach Asien den größten Anteil an den THG-Emissionen hat. Dies liegt zum einen am großen Handelsvolumen, und zum anderen an den weiten Strecken, die auf dem Weg nach Asien zurückgelegt werden. Analog zur Verkehrsleistung überwiegen die THG-Emissionen der Importe diejenigen der Exporte deutlich.

⁵ Diese Vereinfachung musste vorgenommen werden, da keine andere Literatur mit Prognosen zur Entwicklung der THG-Emissionen der Seeschifffahrt gefunden wurde.

Abbildung 17: Aufteilung der THG-Emissionen (WTW) der Seeschifffahrt nach Aus- und Einfuhr sowie Ziel- bzw. Ursprungskontinenten im Jahr 2019



Anmerkung: Emissionen werden nach Quell-Ziel-Prinzip zugeordnet, d.h. jeweils 50% aller deutschen Im- und Exporte auf Deutschland (unabhängig vom Land des verwendeten Seehafens).

Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Im Jahr 2019 betragen die durchschnittlichen Emissionsfaktoren 6,9 g CO_{2e} / tkm (Ausfuhr) und 8,4 g CO_{2e} / tkm (Einfuhr). Der Unterschied von 22 % erklärt sich insbesondere dadurch, dass bei der Einfuhr Massengüter (Kohle, Öl etc.) überwiegen. Im Gegensatz zu Containerschiffen haben Massengutfrachter viele Leerfahrten, da sie nach erledigtem Transport oft leer zurückfahren. Die Emissionen der Leerfahrten werden den auf der Hinfahrt transportierten Gütern zugeordnet (Anthes et al. 2022). Für das Jahr 2050 werden durchschnittliche Emissionsfaktoren von 5,0 g CO_{2e} / tkm (Ausfuhr) bzw. 5,6 g CO_{2e} / tkm (Einfuhr) prognostiziert. Der Rückgang fällt bei den Importen stärker aus, da sich der Anteil der Massengüter an den Gesamtimporten stark verringern wird.

1.5.3 Luftschadstoffe

Tabelle 6 zeigt die gesamten auf Deutschland entfallenden Luftschadstoffemissionen der Seeschifffahrt im Jahr 2019. Aufgrund einer unzureichenden Datengrundlage wurde von einer Prognose der Luftschadstoffemissionen für 2050 abgesehen.

Tabelle 6: Auf Deutschland entfallende Luftschadstoffemissionen der Seeschifffahrt im Jahr 2019 (in Kilotonnen)

Schadstoff	TTW	WTW
NO _x	177	183
PM10	13	14
SO ₂	45	56
NMHC	9	12

Quelle: ifeu-Berechnung auf Basis von (Anthes et al. 2022; DESTATIS 2023c; b). Anmerkung: Die angegebenen Werte basieren auf einem Tank-to-Wheel- (TTW) bzw. Well-to-Wheel-Ansatz (WTW) und sind in Tonnen gegeben. Emissionen werden nach Quell-Ziel Prinzip zugerechnet, d. h. jeweils 50% aller deutschen Im- und Exporte auf Deutschland (unabhängig vom Land des verwendeten Seehafens).

Die Größenordnung der Luftschadstoffemissionen des Seeverkehrs ist hierbei beachtlich, da dieser etwa die gleiche Menge an Stickoxiden und ca. das Vierfache an Partikelemissionen wie der gesamte Lkw-Verkehr in Deutschland ausstößt. Am höchsten sind im Vergleich die SO₂-Emissionen, da in der Seeschifffahrt im Gegensatz zum inländischen Güterverkehr noch kein schwefelfreier Kraftstoff eingesetzt werden muss⁶. Anders als Treibhausgase wirken Luftschadstoffe jedoch hauptsächlich lokal, weshalb die direkten Auswirkungen von Emissionen auf hoher See auf die Bevölkerung wesentlich geringer sein dürften. Demgegenüber kommt es in Hafengebieten zu einer starken Konzentration von Luftschadstoffen mit entsprechenden Auswirkungen auf Anwohner*innen und Beschäftigte. Ebenso tragen die Luftschadstoffemissionen auf hoher See zur Gewässerbelastung bei und im Falle der Partikel auch zum Treibhauseffekt. Zwar existiert bisher in der Klimaberichterstattung noch kein Standardwert für das Klimaerwärmungspotenzial von Rußpartikeln, aber einzelne Untersuchungen kamen zum Ergebnis, dass das GWP 100 von Rußpartikeln zwischen 210 und 1500 bzw. im Mittel 688 mal so hoch ist wie dasjenige von CO₂ (UNEP und WMO 2011).

1.5.4 Sonstige Emissionen

Zur Reduktion des Schwefeldioxidausstoßes können Seeschiffe alternativ zur Verwendung von schwefelarmem Treibstoff auch sog. Scrubber (Rauchgaswäscher) benutzen. In einem Scrubber wird Wasser im Abgas versprüht, welches das Schwefeldioxid und andere Abgasbestandteile aufnimmt. Das dabei entstehende Abwasser darf mit geringen Umweltauflagen in das Meer geleitet werden. Dies führt zu einer Schadstoffbelastung des Meerwassers, zum Beispiel mit Schwermetallen oder polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (UBA 2020).

Weitere Umweltwirkungen des Schiffsbetriebs sind u. a. Einträge von schadstoffbelastetem Abwasser, ölhaltigem Prozesswasser (Bilgenwasser), Abrieb von Antifouling-Material oder auch Unterwasserschall. Darüber hinaus führen Havarien durch Verlust von Ladung und/oder Kraftstoff zu starken lokalen Umweltverschmutzungen. Von 2010 bis 2019 gab es weltweit 62 Ereignisse, bei denen mehr als 7 t Öl aus Öltankern freigesetzt wurden. Insgesamt verloren Öltanker in dieser Dekade 164.000 t Öl (hierbei sind nur Mengen größer als 7 t berücksichtigt). 80 % aller Ölverluste treten in einem Abstand von bis zu 10 Seemeilen von der Küste auf, wo ihre Auswirkungen nochmals problematischer sind als auf hoher See. Insgesamt sind Öltanker-Unfälle in den letzten Jahrzehnten stark rückläufig (ITOPF 2020).

⁶ Dieselloststoff für Lkw sowie den Schienen- und Binnenschiffverkehr darf in Deutschland maximal 10 ppm, also 0,001 % Schwefel enthalten. Für die Kraftstoffe in der Seeschifffahrt gilt ein Grenzwert von 0,1 % für sog. Sulphur Emission Control Areas (SECA), während außerhalb solcher Gebiete ein Schwefelgehalt von bis zu 0,5 % erlaubt ist (UBA 2020).

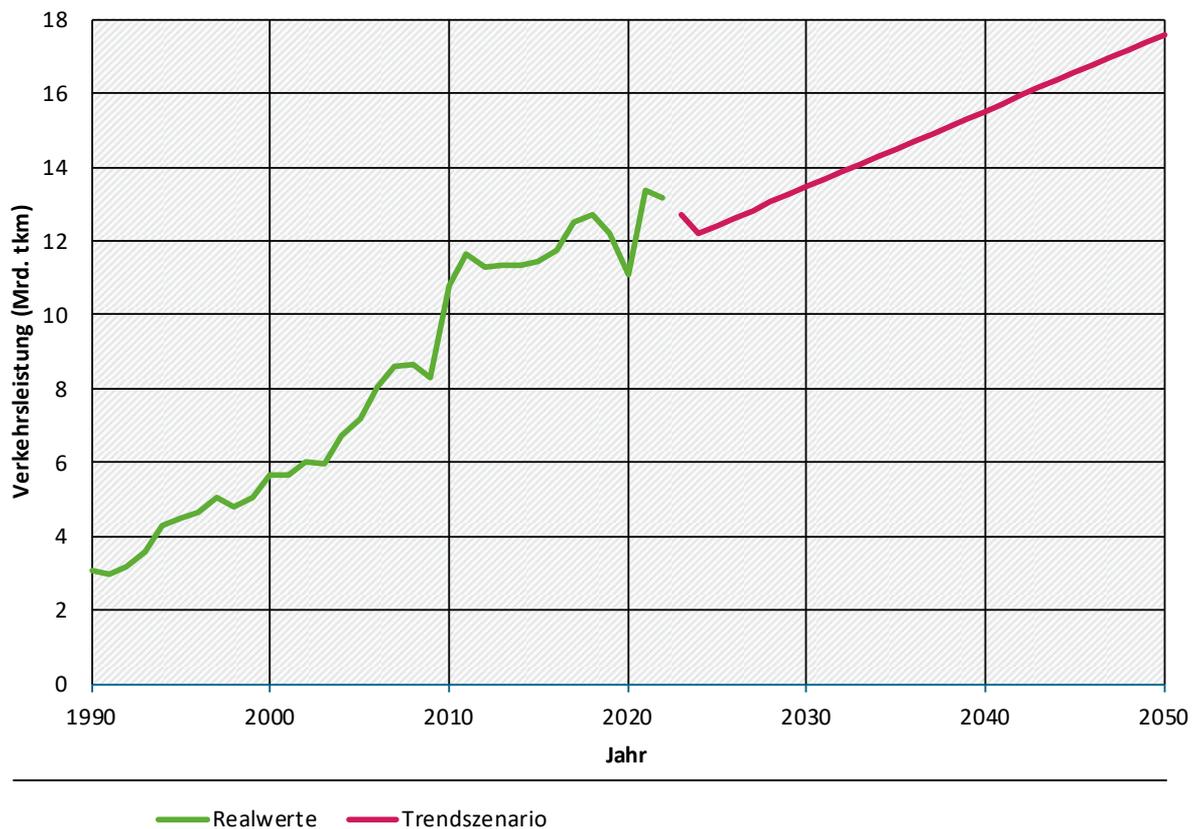
1.6 Luftfrachtverkehr

Dieses Kapitel beschreibt die Verkehrsmengen sowie die Umweltwirkungen des Luftfrachtverkehrs. Hierunter fallen sowohl reine Frachtflüge als auch Passagierflüge mit Belly-Fracht. Im letzteren Fall werden die Emissionen anteilig auf die Belly-Fracht alloziert⁷. Analog zum TREMOD-AV-Modell, auf dem die folgenden Auswertungen zu großen Teilen beruhen, werden alle von deutschen Flughäfen abgehenden Flüge bis zur ersten (Zwischen-)Landung⁸ betrachtet (ifeu 2023).

1.6.1 Güteraufkommen und Verkehrsleistung

Abbildung 18 zeigt die zeitliche Entwicklung der Verkehrsleistung des Luftfrachtverkehrs. Die Verkehrsleistung steigt seit 1990 nahezu kontinuierlich an, jedoch hat sich das Wachstum seit 2010 deutlich verlangsamt. Das TREMOD-Trendszenario geht für die Jahre 2023 und 2024 von einem leichten Rückgang der Verkehrsleistung auf das Niveau von 2019 und anschließend von einem kontinuierlichen Wachstum aus. Gemäß dem Szenario wird der von deutschen Flughäfen abgehende Luftfrachtverkehr im Jahr 2050 eine Verkehrsleistung von 17,6 Mrd. tkm erbringen. Dies sind etwa 44% mehr als im Jahr 2019, in dem sie 12,2 Mrd. tkm betrug.

Abbildung 18: Entwicklung der Verkehrsleistung des von deutschen Flughäfen abgehenden Luftfrachtverkehrs bis 2022 und im Trendszenario bis 2050



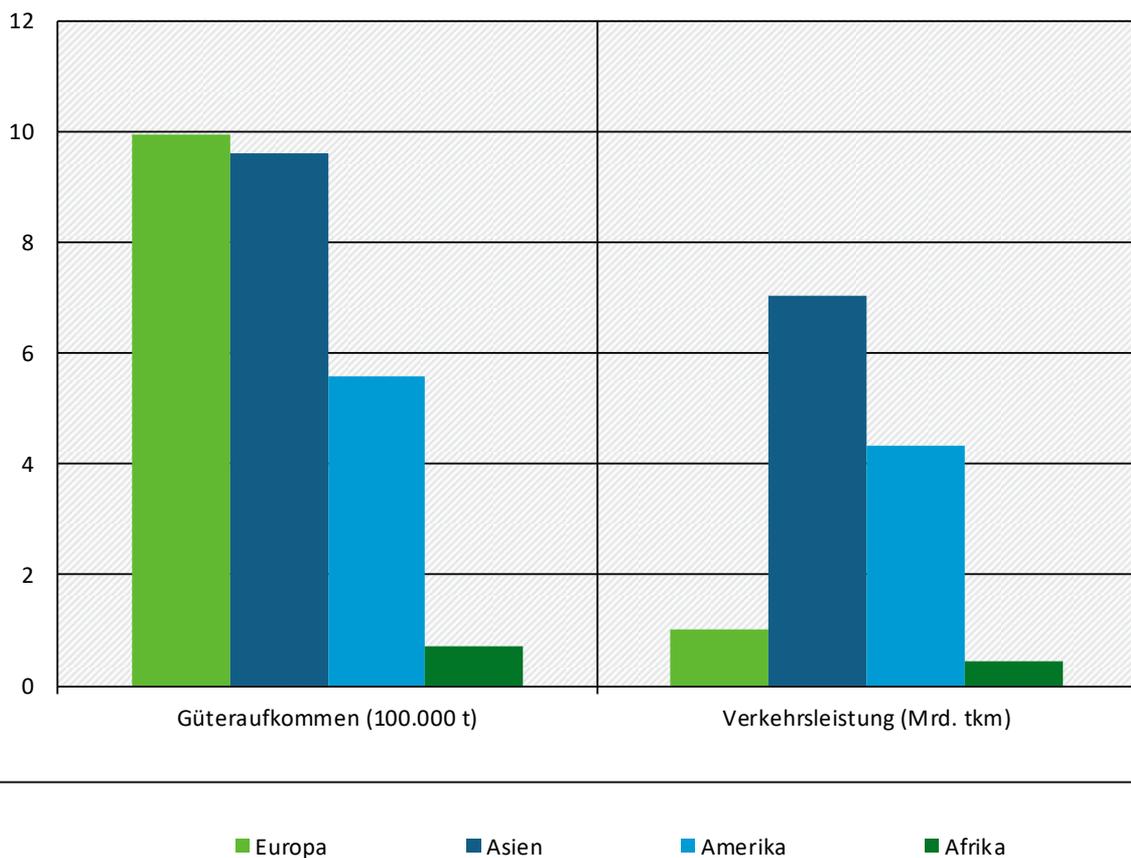
Quelle: eigene Darstellung, ifeu

⁷ Hierfür wird, wie üblich, angenommen, dass 100 kg Fracht einem Passagier inkl. Gepäck entspricht.

⁸ Bezogen auf das Güteraufkommen ist der Unterschied zwischen abgehenden und ankommenden Flügen gering. Im Jahr 2019 wurden an deutschen Flughäfen 2,48 Mio. t Fracht eingeladen, während 2,32 Mio. t Fracht ausgeladen wurden (DESTATIS 2020).

Abbildung 19 stellt das Güteraufkommen und die Verkehrsleistung des Luftfrachtverkehrs im Jahr 2019 nach Zielkontinent dar. Das Güteraufkommen (in Tonnen) auf Flügen innerhalb Europas (38% des Güteraufkommens) und nach Asien (37%) ist am höchsten, gefolgt von Amerika (22%) und Afrika, wohin nur 3% der Güter transportiert werden. Nach Ozeanien wurden aufgrund der großen Distanzen im Jahr 2019 keine Güter direkt transportiert. Insgesamt betrug das Güteraufkommen im Jahr 2019 2,58 Mio. t. Bezogen auf die Verkehrsleistung in Tonnenkilometern dominieren Flüge nach Asien (55%) und Amerika (34%) den Luftfrachtverkehr, wohingegen innereuropäische Flüge (8%) aufgrund der geringen Distanzen und Flüge nach Afrika (3%) und des geringen Güteraufkommens nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die Bedeutung des innerdeutschen Luftfrachtverkehrs ist sehr gering. Dieser hatte 2019 einen Anteil von 0,5% an der Gesamtverkehrsleistung.

Abbildung 19: Güteraufkommen und Verkehrsleistung des von deutschen Flughäfen abgehenden Luftfrachtverkehrs nach Zielkontinent im Jahr 2019



Anmerkung: Ozeanien wird nicht aufgeführt, da im Jahr 2019 keine Fracht direkt dorthin transportiert wurde.

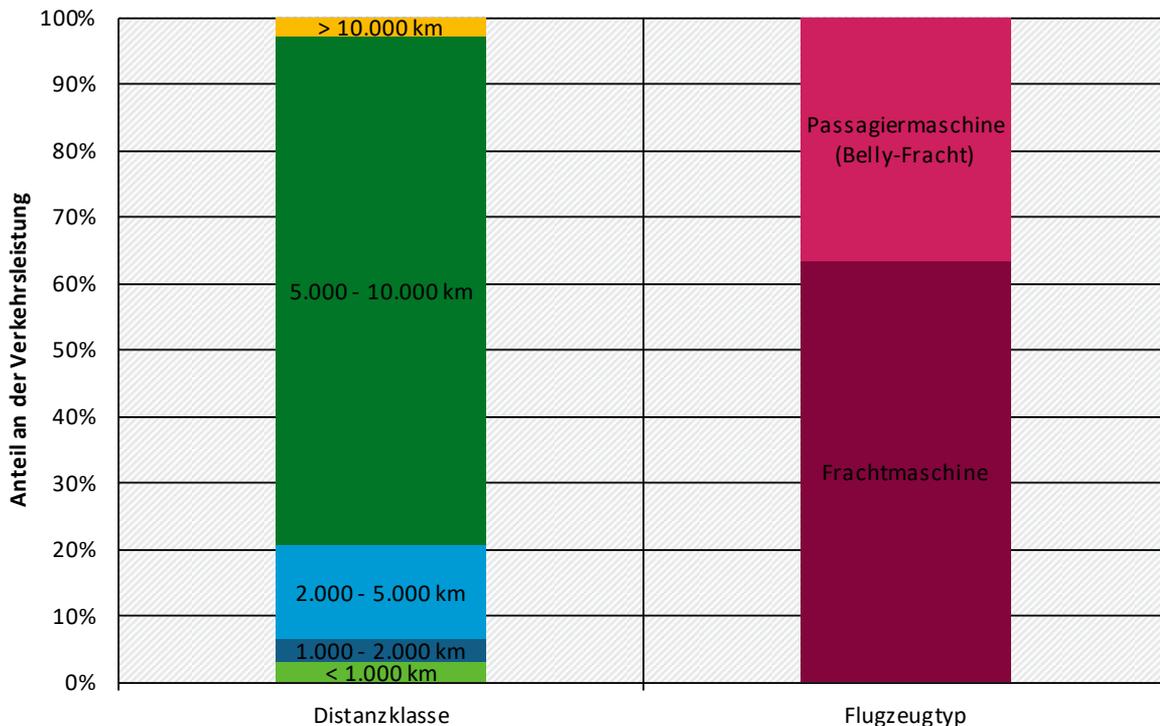
Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Die beschriebene Aufteilung der Verkehrsleistung auf die Zielkontinente spiegelt sich in ihrer Verteilung auf verschiedene Distanzklassen wider (siehe Abbildung 20). 77% der Verkehrsleistung werden auf Flügen mit einer Länge zwischen 5.000 und 10.000 km (hauptsächlich nach Asien und Amerika) erbracht und 14% auf Flügen mit einer Länge zwischen 2.000 km und 5.000 km (hauptsächlich Nordafrika und Vorderasien).

Abbildung 20 zeigt ebenfalls, dass knapp zwei Drittel der Verkehrsleistung von reinen Frachtflugzeugen erbracht werden, während für die restlichen 37% Passagiermaschinen genutzt

werden, welche die Güter als Belly-Fracht im Unterdeck transportieren. Die Aufteilung der Luftfracht auf Passagiermaschinen und Frachtmaschinen ist stark ziellandabhängig, zum Beispiel beläuft sich der Anteil der Beiladefracht an Transporten nach Kanada auf 74%, wohingegen er für das Zielland Mexiko nur 29% beträgt.

Abbildung 20: Aufteilung der Verkehrsleistung im Luftfrachtverkehr nach Distanzklasse bzw. Flugzeugtyp im Jahr 2019

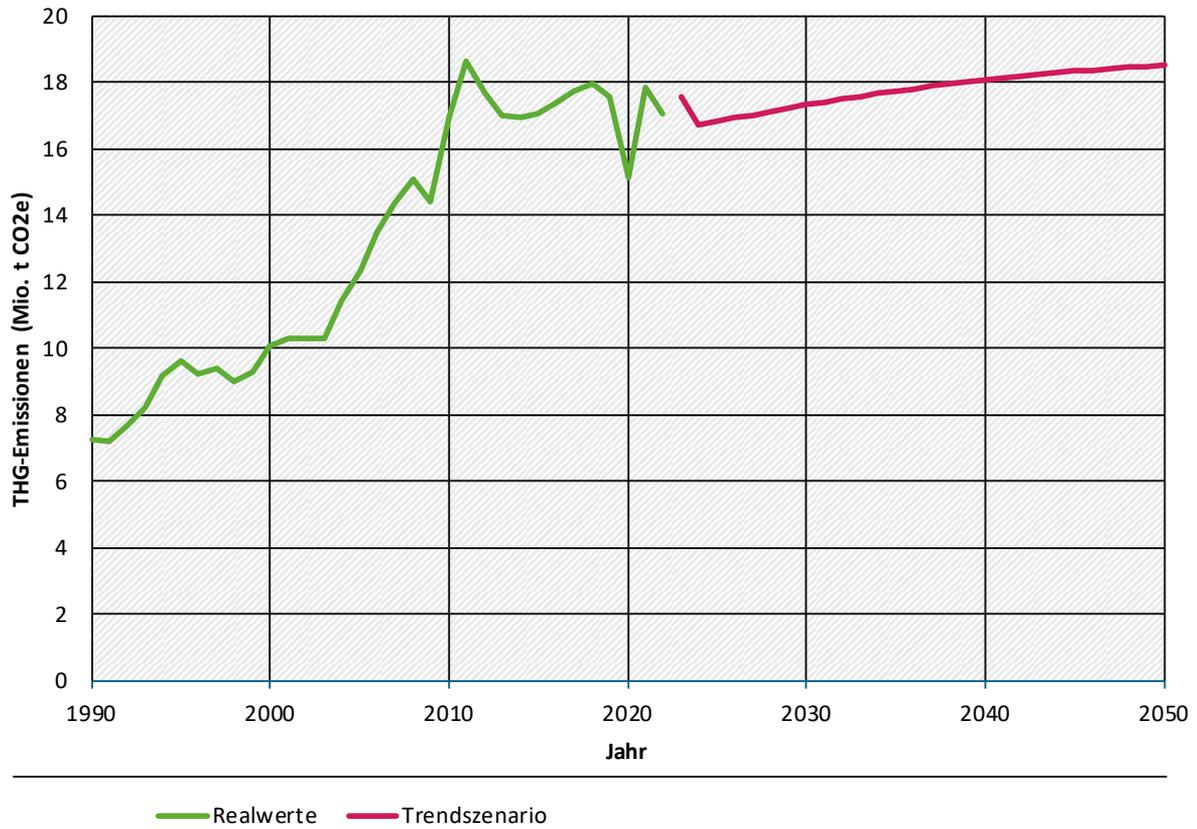


Quelle: eigene Darstellung, ifeu

1.6.2 THG-Emissionen und Klimawirkung

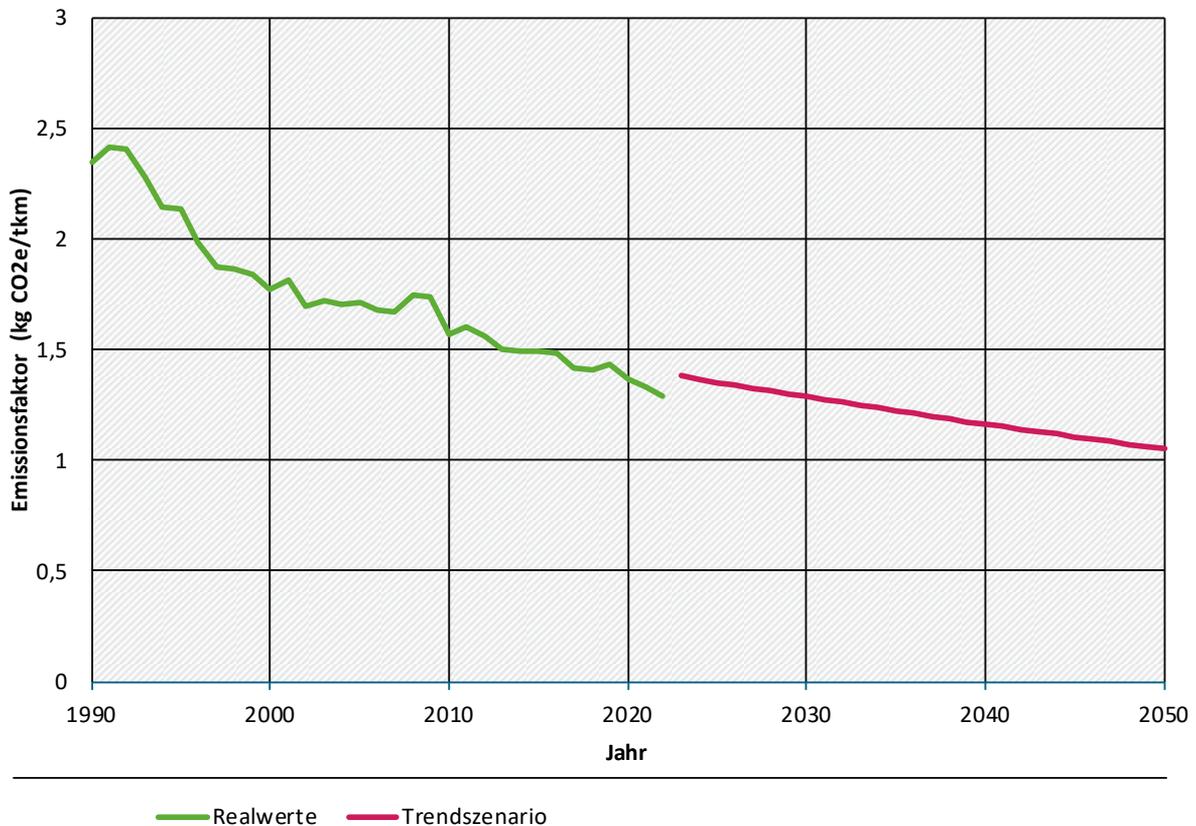
Abbildung 21 zeigt die zeitliche Entwicklung der Klimawirkung (in diesem Abschnitt immer THG-Emissionen inklusive Vorketten sowie zusätzliche Klimawirkung der Emissionen in großen Höhen) von 1990 bis 2022 sowie im TREMOD-Trendszenario bis 2050. Die jährliche Klimawirkung des Luftfrachtverkehrs nahm von 1990 bis 2010 kontinuierlich auf mehr als das Doppelte zu und stagniert seitdem. Verglichen mit der Verkehrsleistung (siehe Abbildung 18) fiel der Anstieg jedoch weniger stark aus. Dies spiegelt sich in Abbildung 22 dargestellten Emissionsfaktor wider. Die spezifische Klimawirkung sank von 2,3 kg CO_{2e}/tkm im Jahr 1990 auf 1,3 kg CO_{2e}/tkm im Jahr 2022. Dieser Trend soll sich auch in den kommenden Jahren fortsetzen. Die Lufthansa gibt an, durch die geplante Modernisierung ihrer Flotte den Treibstoffverbrauch ihrer Flugzeuge bis 2035 um etwa 1% pro Jahr zu senken (Bopst et al. 2019). Weltweit werden für die Zeit von 2020 bis 2030 sogar Einsparungen von 1,4% p. a. prognostiziert (Cames et al. 2021). Im Einklang mit den Angaben der Lufthansa nimmt das TREMOD-AV-Modell eine Verringerung der spezifischen Klimawirkung um 1% pro Jahr an (Bezugsjahr: 2019). Trotz des prognostizierten Rückgangs des Emissionsfaktors auf 1,1 kg CO_{2e}/tkm im Jahr 2050 werden die Emissionen pro Tonnenkilometer des Luftfrachtverkehrs weiterhin etwa 200-mal so hoch sein wie die der Seeschifffahrt (vgl. Kapitel 1.5.2). Zudem steigt die Verkehrsleistung voraussichtlich schneller als die spezifischen Emissionen sinken, woraus, wie in Abbildung 21 dargestellt, ein leichter Anstieg der absoluten Klimawirkung des Luftfrachtverkehrs bis zum Jahr 2050 folgt.

Abbildung 21: Entwicklung der jährlichen Klimawirkung (WTW THG-Emissionen und zusätzliche Klimawirkung in großen Höhen) des von deutschen Flughäfen abgehenden Luftfrachtverkehrs bis 2022 und im Trendszenario bis 2050



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

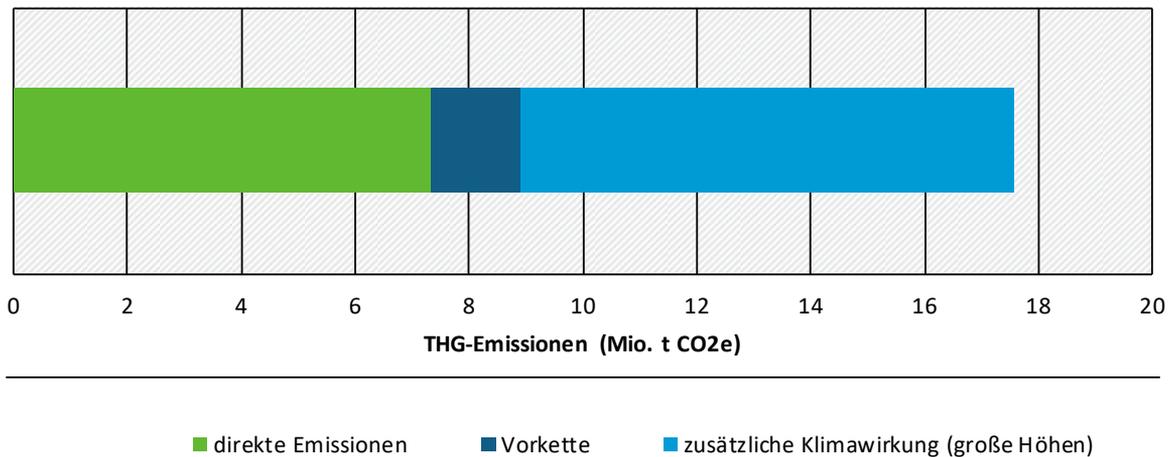
Abbildung 22: Entwicklung der Klimawirkung pro Tonnenkilometer (THG-Emissionen WTW und zusätzliche Klimawirkung in großen Höhen) des von deutschen Flughäfen abgehenden Luftfrachtverkehrs bis 2022 und im Trendszenario bis 2050



Quelle: eigene Darstellung, ifeu. Anmerkung: Das Trendszenario verwendet das Jahr 2019 als Stützjahr, da sich die Jahre 2020-2022 aufgrund von Sondereffekten (u.a. geringerer Anteil der Belly-Fracht aufgrund der COVID-19-Pandemie) nicht als Referenz eignen.

Die Klimawirkung des Luftverkehrs setzt sich im Wesentlichen aus drei Komponenten zusammen, welche in Abbildung 23 dargestellt sind. Die direkten Emissionen, d. h. die bei der Verbrennung von Kerosin entstehenden Treibhausgase (hauptsächlich CO₂), tragen nur zu 42% zur Klimawirkung des Luftfrachtverkehrs bei. Hinzukommen, ebenso wie bei anderen Verkehrsträgern, die Vorkettenemissionen, welche bei der Bereitstellung des Kraftstoffs entstehen (9%). Der Ausstoß von Stickoxiden, Wasserdampf und weiteren Emissionen in großen Höhen sowie die daraus resultierende Wolkenbildung führen zu einer Klimaerwärmung, die weit über die Wirkung der direkten CO₂-Emissionen hinausgeht (Öko-Institut 2020). Diese sogenannten nicht-CO₂-Effekte machen etwa die Hälfte der Klimawirkung des Luftfrachtverkehrs aus. Neuere Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die nicht-CO₂-Effekte eine noch höhere Klimawirkung haben als hier dargestellt (Allekotte et al. noch unveröffentlicht).

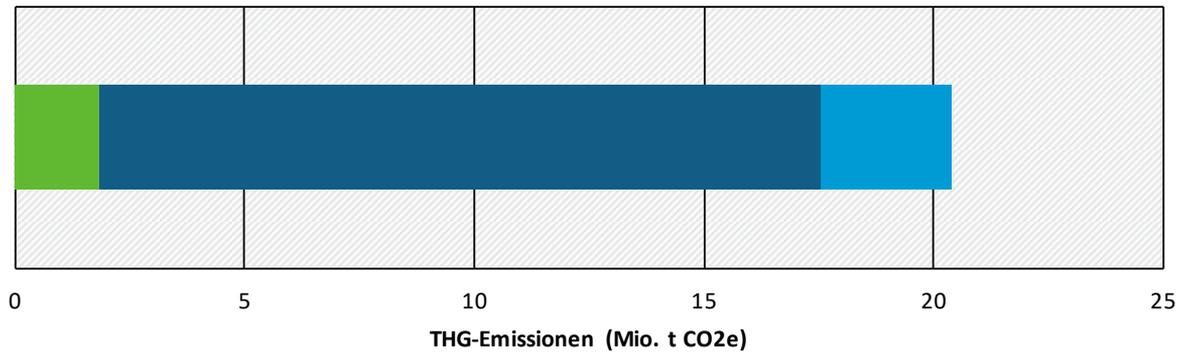
Abbildung 23: Klimawirkung des von deutschen Flughäfen abgehenden Luftfrachtverkehrs im Jahr 2019



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Die in diesem Kapitel ausgewiesene Klimawirkung bezieht sich auf von deutschen Flughäfen abgehende Flüge bis zur ersten (Zwischen-)Landung, da alle verfügbaren Statistiken (z. B. (DESTATIS 2020; Fraport 2020)) zum Luftverkehr diese Abgrenzung verwenden. Dies ist problematisch, da Frachtflugzeuge regelmäßig aus wirtschaftlichen Gründen einen Zwischenstopp zum Tanken einlegen oder die Ladung bei mehreren aufeinanderfolgenden Stopps allmählich ausladen. Somit wird die Klimawirkung des internationalen Luftverkehrs in den deutschen Statistiken systematisch unterschätzt. Zur Bestimmung der Größenordnung der nicht betrachteten Emissionen wurde im Rahmen des Projekts eine auf der Außenhandelsstatistik aufbauende Schätzung durchgeführt, deren Resultat in Abbildung 24 dargestellt wird (für Details zum Vorgehen siehe Anhang A.2.3). Unter Einbeziehung der realen Transportdistanzen wäre die Klimawirkung ungefähr 16% höher als bei der reinen Betrachtung der Strecke bis zur ersten (Zwischen-)Landung. Hierbei ist zu beachten, dass dieser Wert eine grobe Schätzung darstellt, d. h. mit einer großen Unsicherheit behaftet ist und daher nur zur Einordnung der Größenordnung des Problems dienen soll. Zudem bezieht sich der gegebene Wert nur auf die Verlängerung der Transportdistanzen und beinhaltet dagegen nicht die zusätzlichen Emissionen aufgrund der Zwischenlandungen selbst.

Abbildung 24: Klimawirkung des von Deutschland ausgehenden Luftfrachtverkehrs im Jahr 2019 inkl. Zuschätzung für Streckenabschnitte nach der 1. Landung



■ innereuropäische Flüge ■ außereuropäische Flüge bis zur 1. Landung ■ Zuschätzung außereuropäische Flüge

Anmerkung: Die Zuschätzung ist mit einer großen Unsicherheit behaftet und dient daher nur zur Einordnung der Größenordnung der Emissionen von Streckenabschnitten nach der ersten Zwischenlandung.

Quelle: eigene Darstellung, ifeu

1.6.3 Luftschadstoffe

Tabelle 7 zeigt die direkten Luftschadstoffemissionen des von deutschen Flughäfen abgehenden Luftfrachtverkehrs im Jahr 2019 sowie in der Prognose für 2050. Während die Verbesserung des NO_x-Emissionsfaktors durch den Zuwachs bei der Verkehrsleistung überkompensiert und somit die NO_x-Emissionen von 2019 bis 2050 um 23% sinken werden, steigen Feinstaub- und SO₂-Emissionen in diesem Zeitraum leicht an⁹.

Tabelle 7: Luftschadstoffemissionen des von deutschen Flughäfen abgehenden Luftfrachtverkehrs in den Jahren 2019 und 2050 (TTW, in Tonnen)

Schadstoff	2019	2050
NO _x	39.264	30.230
PM10	320	336
SO ₂	1.948	2.054

Quelle: (ifeu 2023)

Von den Luftschadstoffemissionen des Luftverkehrs sind vor allem die Anwohner*innen im Bereich von Flughäfen betroffen. . Beispielsweise trägt der Luftverkehr noch einen Kilometer außerhalb des Frankfurter Flughafengeländes mit 25% zur Ultrafeinpartikelbelastung bei (Lorentz et al. 2021).

1.6.4 Sonstige Emissionen

Bei den sonstigen Emissionen des Luftfrachtverkehrs sind insbesondere Lärmemissionen zu nennen. Laut (UBA 2022b) fühlen sich 43 % der Deutschen von Flugverkehrslärm belästigt, wobei jedoch nicht zwischen Personen- und Güterverkehrsmaschinen unterschieden wird.

⁹ Eine noch stärkere Verringerung des SO₂-Emissionsfaktors ist möglich durch den Einsatz von Sustainable Aviation Fuels (SAF), die in der Regel schwefelfrei sind. SAF sind im TREMOD-Trendszenario derzeit nur in geringen Mengen enthalten.

Allerdings sind beispielsweise am Flughafen Halle/Leipzig in der besonders lärmsensiblen Nachtzeit, abgesehen von einigen Ausnahmen, zwar kein Personenverkehr, aber Frachtflüge zulässig.

1.7 THG-Emissionen des Güterverkehrs im Lebenszyklus

Im Jahr 2019 hat Deutschland laut Daten des UBA THG-Emissionen in Höhe von 795 Mio. t CO_{2e} emittiert (UBA 2022a). Davon entfielen ca. 19,3%, d. h. 164 Mio. CO_{2e}, auf den nationalen Verkehr. Der nationale Güterverkehr machte mit ca. 54 Mio. t CO_{2e} ca. 1/3 der Emissionen des Verkehrs aus. Den Hauptanteil der THG-Emissionen am nationalen Güterverkehr hatte der Straßengüterverkehr.

Der Güterverkehr verursacht THG-Emissionen in verschiedenen Bereichen, welche jedoch nicht unter den Verkehr im KSG fallen und dort nicht erfasst werden. Dazu gehören:

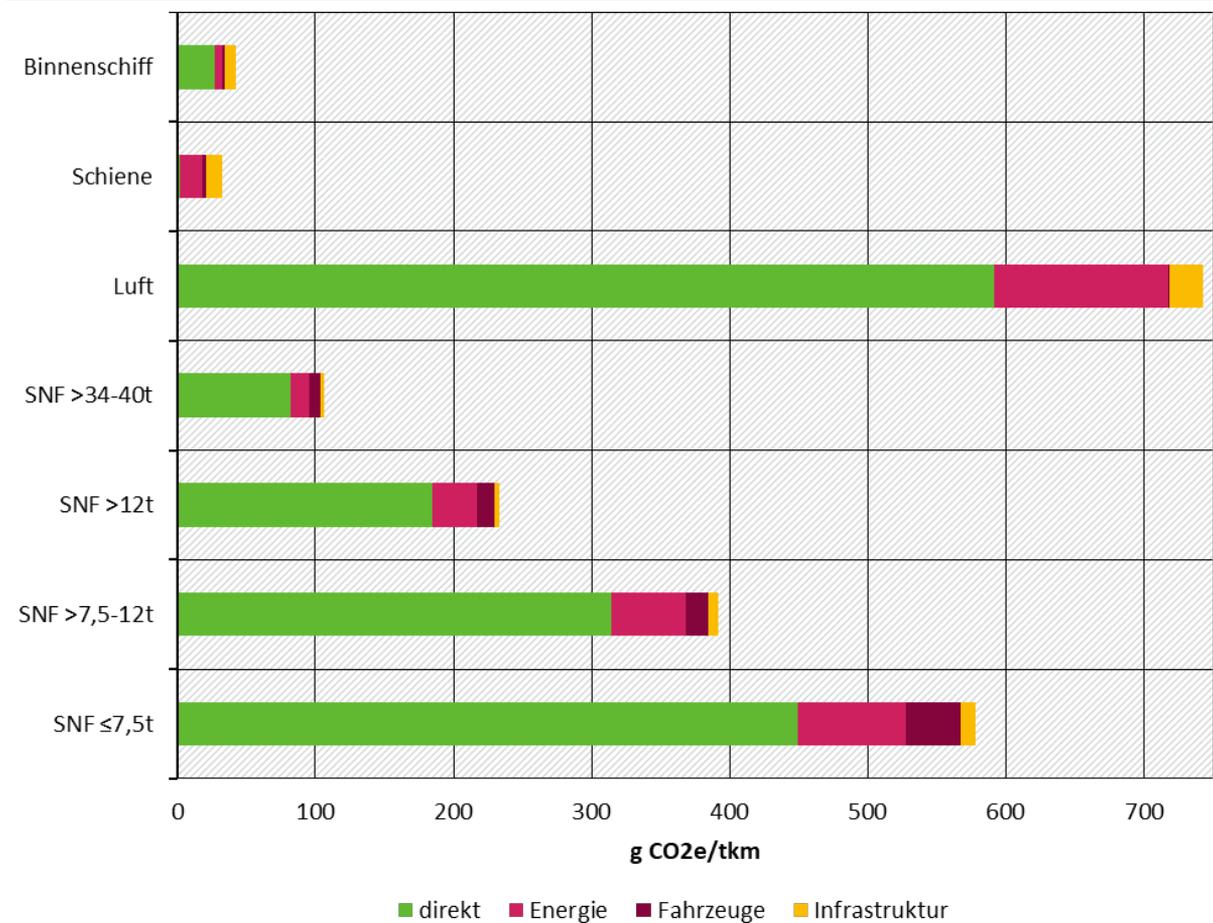
1. Internationale Verkehre
2. Zusätzliche Klimawirkungen des Luftverkehrs in großen Höhen
3. Energiebereitstellung (Well-to-Tank) Emissionen
4. Fahrzeugherstellung
5. Bau und Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur
6. Lager und Umschlag

Die Aspekte 1 bis 3 werden in den vorigen Kapiteln beschrieben und quantifiziert, eine Abschätzung zu den Emissionen von Lagern folgt in diesem Kapitel. Im Folgenden wird darauf eingegangen, welchen Anteil diese zusätzlichen Wirkungen an den THG-Emissionen des Güterverkehrs haben. Über die genannten Bereiche hinaus gibt es zusätzliche Treibhausgaseffekte, welche in diesem Bericht jedoch nicht untersucht wurden, z. B. durch den Einsatz bzw. den Verlust von Kühlmitteln, den Warenumschlag sowie durch den Klimaeffekt von Rußpartikeln (Black Carbon) insbesondere in der Seeschifffahrt. Diese werden hier der Vollständigkeit halber erwähnt.

1.7.1 Vergleich der spezifischen THG-Emissionen

Abbildung 25 stellt die durchschnittlichen THG-Emissionen pro Tonnenkilometer pro Verkehrsart dar aus (Allekotte et al. 2020). Diese Zahlen gelten dabei für das in der Studie verwendete Bezugsjahr 2017, da keine aktuelleren Zahlen vorliegen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich das Verhältnis zwischen WTW-THG-Emissionen und Beiträgen aus Fahrzeugherstellung und Infrastruktur zwischen 2017 und 2019 nicht grundlegend verändert hat.

Abbildung 25: Durchschnittliche Klimawirkung des Güterverkehrs in Deutschland im Jahr 2017 im Lebenszyklus (g CO_{2e}/tkm sowie Fahrzeug-/Infrastrukturbereitstellung)



Quelle: Grafik nach (Allekotte et al. 2020). Anmerkung: Luft = internationaler Luftfrachtverkehr (ohne Zusatzwirkung). Direkt = tank-to-wheel; Energie = Energiebereitstellung (well-to-tank), Fahrzeuge = Fahrzeugherstellung, Infrastruktur = Infrastrukturbereitstellung (Allokation der Infrastrukturemissionen zwischen Personen- und Güterverkehr anhand der Bruttotonnenkilometer (Fahrzeugmasse inklusive Fracht bzw. Passagieren))

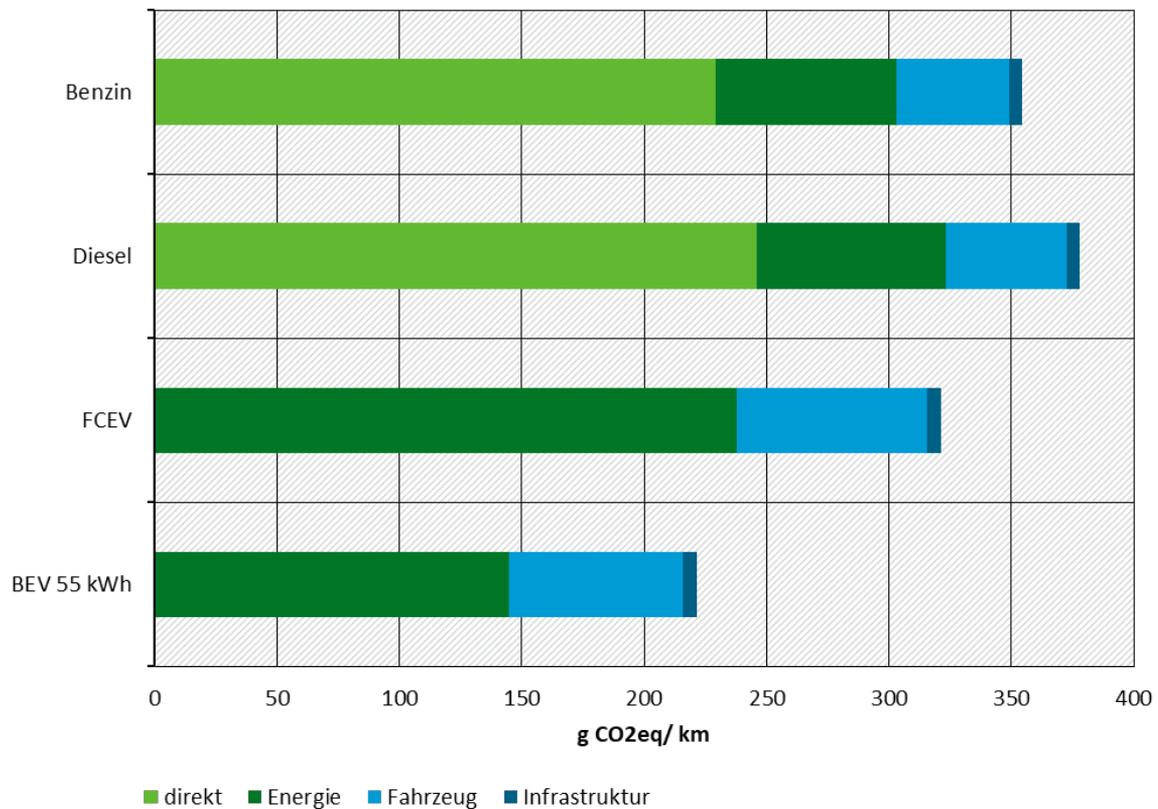
Beim Straßengüterverkehr dominieren die direkten Treibhausgasemissionen aus der Kraftstoffverbrennung sowie die Energievorketten. Weniger relevant sind die Fahrzeuge (Herstellung, Wartung sowie Entsorgung) sowie die Straßenverkehrsinfrastruktur.

Auch bei den anderen Güterverkehrsmitteln sind heute vor allem die direkten Emissionen sowie die Energiebereitstellung relevant. Dabei sind im Bereich von Schiene, Luft und Wasser die Fahrzeuge deutlich weniger wichtig als beim Straßengüterverkehr, da diese extrem hohe Lebenslaufleistungen aufweisen und somit über viele Kilometer abgeschrieben werden. Auch hier ist die Verkehrsinfrastruktur von nachgelagerter Relevanz, allerdings zeigt sich beim Schienengüterverkehr, dass diese im Verhältnis zum Straßengüterverkehr an Wichtigkeit gewinnt.

Während beim Luftverkehr und in der Schifffahrt auch in den nächsten 10 Jahren vor allem konventionelle Fahrzeuge, welche mit überwiegend (fossilen) Flüssigkraftstoffen angetrieben werden, eingesetzt werden dürften, gewinnt im Straßengüterverkehr die Nutzung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben an Wichtigkeit.

Daher werden im Folgenden exemplarisch die Treibhauspotenziale von leichten Nutzfahrzeugen (N1-III) pro Fahrzeugkilometer mit verschiedenen Antriebsarten gezeigt.

Abbildung 26: Treibhauspotenziale von leichten Nutzfahrzeugen nach Antriebsart im Lebenszyklus



Anmerkung: Betrachtet wurde das Baujahr 2020 mit einer Entwicklung der Strombereitstellung nach UBA GreenLate und unter Verwendung eines gleitenden Strommixes für die Elektrofahrzeuge.

Quelle: eigene Darstellung basierend auf (Biemann et al. 2024) (Fahrzeuge, Energie sowie direkte Emissionen) sowie (Allekotte et al. 2020) (für Infrastruktur)

Es zeigt sich, dass ein elektrisches leichtes Nutzfahrzeug ein deutlich geringeres Treibhauspotenzial als die konventionellen Verbrennerfahrzeuge aufweist. Die direkten Emissionen betragen dann 0, dafür haben Strombereitstellung sowie Fahrzeuge einen größeren Einfluss. Ähnliche Trends lassen sich auch für die Solo-Lkw sowie die Last- und Sattelzüge beobachten, wobei hier den direkten Emissionen sowie der Energiebereitstellung noch eine größere Rolle zukommt als bei den leichten Nutzfahrzeugen.

1.7.2 Emissionen durch Lager/Logistikimmobilien

Eine detaillierte Berechnung der durch Lagerei verursachten Emissionen wurde im UBA-Projekt PULK¹⁰ durchgeführt und die Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Hierbei wird der Bedarf an Nutzenergie für Heizung, Warmwasser, Beleuchtung, Lüftung inkl. Be-/Entfeuchtung, Kühlung inkl. Hilfsenergie sowie mechanische Arbeit z. B. mit Gabelstaplern berücksichtigt. Die Lagerflächen für Deutschland wurden aus der Datenbank L.Immo (Stand

¹⁰ „Umwelt und Klimaschutz in der Logistik - Potenziale umweltorientierter Logistikkonzepte zur Reduzierung der Emissionen des Güterverkehrs (PULK)“ FKZ 3719 58 103 0. Zum Zeitpunkt dieses Berichts war die Studie zu PULK noch nicht veröffentlicht.

07/2021) des Fraunhofer SCS ermittelt. Die Lagergebäudeflächen wurden weiter unterteilt nach: Grad der Automatisierung, Heizung/Kühlung sowie des Effizienzstandards des Gebäudes (z. B. neu/saniert vs. Altbau). Für die jeweiligen Wirkungsgrade und Emissionsfaktoren für Heizung werden die Anteile der Energieträger (z. B. Öl, Fernwärme) bzw. für Strom der Bundesstrommix zugrunde gelegt.

Insgesamt betrug die Lagerfläche im Jahr 2019 413 Mio. m². Zum Vergleich: dies entspricht 0,1% der Landesfläche Deutschlands oder 2,3% aller Verkehrsflächen wie vom statistischen Bundesamt im Jahr 2019 angegeben (DESTATIS 2023d). Nach den Berechnungen des PULK Projektes ergeben sich somit insgesamt deutschlandweit im Jahr 2019 THG-Emissionen in Höhe von 43 Mio. t CO_{2e}. Für das Jahr 2030 wird eine Zunahme der Lagergebäudeflächen um ca. 19% angenommen, gleichzeitig sinken die THG-Emissionen insgesamt um 31%, da die spezifischen Emissionen pro Lager-m² u. a. aufgrund der zunehmenden Gebäudesanierung und des zunehmenden Anteils erneuerbarer Energien an Strom und Wärme sinken.

Tabelle 8: Deutschlandweite Fläche und THG-Emissionen von Lagergebäuden für den Güterverkehr im Jahr 2019 und 2030 nach Analysen des PULK-Projekts

Jahr	Fläche [km ²]	t CO _{2e} WTW/m ²	Mio. t CO _{2e} WTW
2019	413	0,104	43,0
2030	491	0,070	29,0
Änderung 2030/2019	+19%	-42%	-31%

1.7.3 THG-Emissionen des Güterverkehrs insgesamt

Im Folgenden werden die THG-Emissionen des Güterverkehrs in Deutschland insgesamt dargestellt (siehe Abbildung 27).

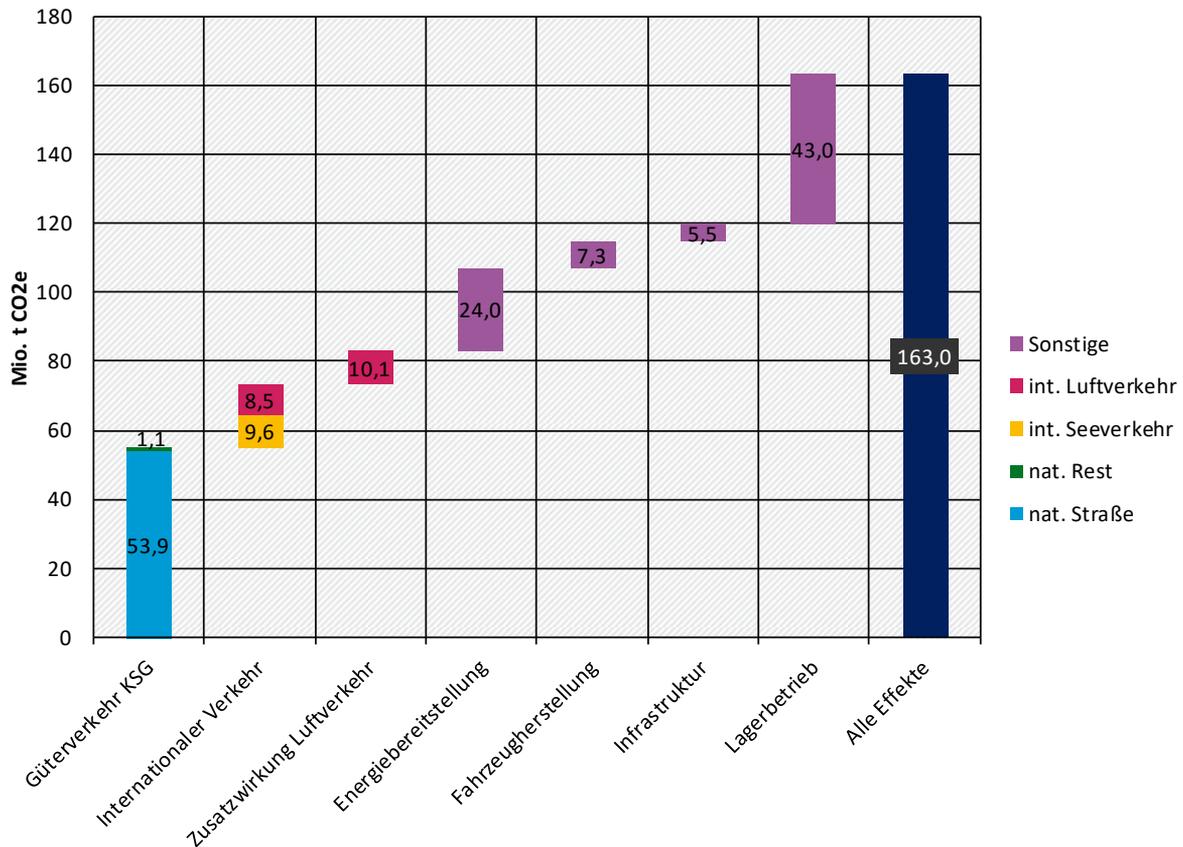
- ▶ Im Rahmen der für das Klimaschutzgesetz zu berichtenden THG-Emissionen hatte der Güterverkehr im Jahr 2019 ca. 54 Mio. t CO_{2e} ausgestoßen und war damit für ca. 1/3 der THG-Emissionen des gesamten Verkehrssektors verantwortlich (siehe Einleitung in Kapitel 1).
- ▶ Durch die nicht im KSG enthaltenden internationalen Verkehre aus bzw. nach Deutschland, inklusive der zusätzlichen Klimawirkung des Luftverkehrs in großen Höhen, erhöht sich der Treibhausgasereffekt des Güterverkehrs auf über 80 Mio. t CO_{2e}.
- ▶ Mit den sonstigen Emissionen für die Energiebereitstellung, Fahrzeugherstellung, Infrastruktur¹¹ und Lagerei, welche zwar durch den deutschen Güterverkehr entstehen, aber in anderen Sektoren (z. B. Energiewirtschaft) oder in anderen Ländern (z. B. Abbau von Ressourcen) auftreten, betragen die THG-Emissionen mit ca. 160 Mio. t CO_{2e} ca. das 3-fache des im KSG erfassten Werts.

Diese Darstellung soll verdeutlichen, dass im Bereich des Güterverkehrs erhebliche Potenziale zur THG-Einsparung vorhanden sind, welche über den nationalen Verkehr hinaus auch in anderen Sektoren bzw. global zur Geltung kommen können. Selbst wenn diese nicht im

¹¹ Allokation der Infrastrukturemissionen zwischen Personen- und Güterverkehr anhand der Bruttotonnenkilometer (Fahrzeugmasse inklusive Fracht bzw. Passagieren nach (Allekotte et al. 2020))

Verkehrssektor gemäß der Abgrenzung des KSG anrechenbar sind, können sie beispielsweise von Speditionsunternehmen, Unternehmen im Handel oder Produktionsunternehmen, welche sich eigene Klimaziele setzen, genutzt werden.

Abbildung 27: THG-Emissionen des deutschen Güterverkehrs 2019 nach Klimaschutzgesetz (KSG) und unter Berücksichtigung weiterer Klimawirkungen



Quelle: ifeu-Grafik. Anmerkungen: Güterverkehr KSG: Quelle TREMOD 6.43, nur direkte Emissionen (TTW) fossiler Energieträger und nach Energiebilanzprinzip; Internationaler Verkehr: Analysen in diesem Bericht; Energiebereitstellung: Quelle TREMOD 6.43 und Analysen in diesem Bericht; Fahrzeugherstellung und Infrastruktur, siehe Anhang: (Allekotte et al. 2020) und Analysen in diesem Bericht; Lagerbetrieb (betrifft nur Lager in Deutschland): UBA-Projekt PULK

Die Analysen der einzelnen Verkehrsträger (siehe Kapitel 1.2 bis 1.6) zeigen, dass die Treibhausgasemissionen mit den aktuell beschlossenen Maßnahmen bis zum Jahr 2030 nur langsam sinken dürften. In der Abgrenzung nach KSG würde der nationale Güterverkehr damit im Jahr 2030 noch ca. 50 Mio. t CO_{2e} ausstoßen. Dies entspricht fast 60% der zulässigen Höchstmenge von 84 Mio. t CO_{2e} für den nationalen Verkehr nach KSG (siehe Einleitung, Kapitel 1). Ohne weitere Maßnahmen im Güterverkehr müsste somit der Personenverkehr seine THG-Emissionen gegenüber dem Jahr 2019 um ca. 70% (von 110 auf 34 Mio. t CO_{2e}) reduzieren, um das sektorale Klimaziel noch einhalten zu können. Auch die Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 ist mit den bestehenden Maßnahmen für den Güterverkehr voraussichtlich nicht zu erreichen.

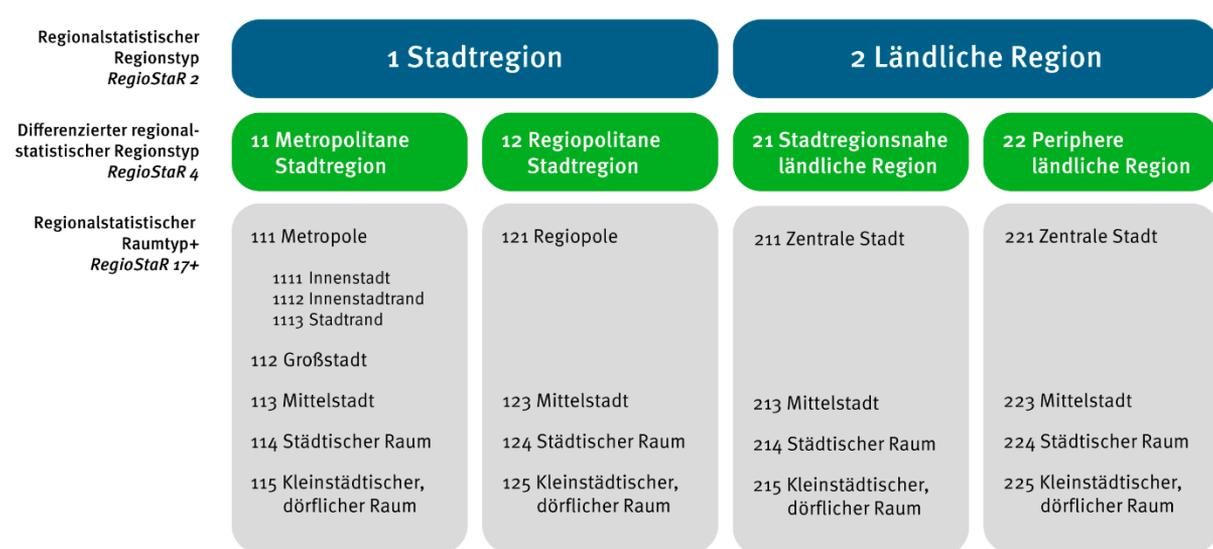
2 Verkehrsmengen und Umweltwirkungen urbane Logistik

2.1 Methodischer Rahmen

2.1.1 Abgrenzung Urbaner Raum

In den Datengrundlagen und Statistiken zum Güterverkehr (z.B. KBA, Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Verkehrsstatistiken des statistischen Bundesamtes (Destatis), „Verkehr in Zahlen“ (ViZ) sowie den Verkehrsprognosen des BMDV) ist der Begriff urbaner Raum nicht zu finden. Es gibt die Straßenkategorie „Innerorts“ oder den Nahbereich (bis 50 km) in dem Güter transportiert werden, mit denen aber die verdichteten Stadtbereiche mit ihren besonderen Anforderungen an die Logistik nicht richtig gegriffen werden können. Die hohe Verkehrsbelastung, Einfahrtsbeschränkungen für Lkw, hohe Stoppdichte, geringe Verfügbarkeit von Be- und Entladezonen sind nur einige Aspekte, die sich auf die innerstädtischen Touren auswirken. Um Aussagen zu der Verkehrsleistung, den eingesetzten Fahrzeugen und daraus abgeleiteten Umweltwirkungen der urbanen Logistik zu treffen, wurde daher ein auf Einwohnerdichte bezogener Ansatz gewählt. Dieser orientiert sich, wie in Abbildung 28 dargestellt, an der Einteilung der regionalstatistischen Raumtypologie (RegioStaR) des BMDV (BMDV 2021).

Abbildung 28: Regionalstatistische Raumtypologie für die Mobilitäts- und Verkehrsforschung



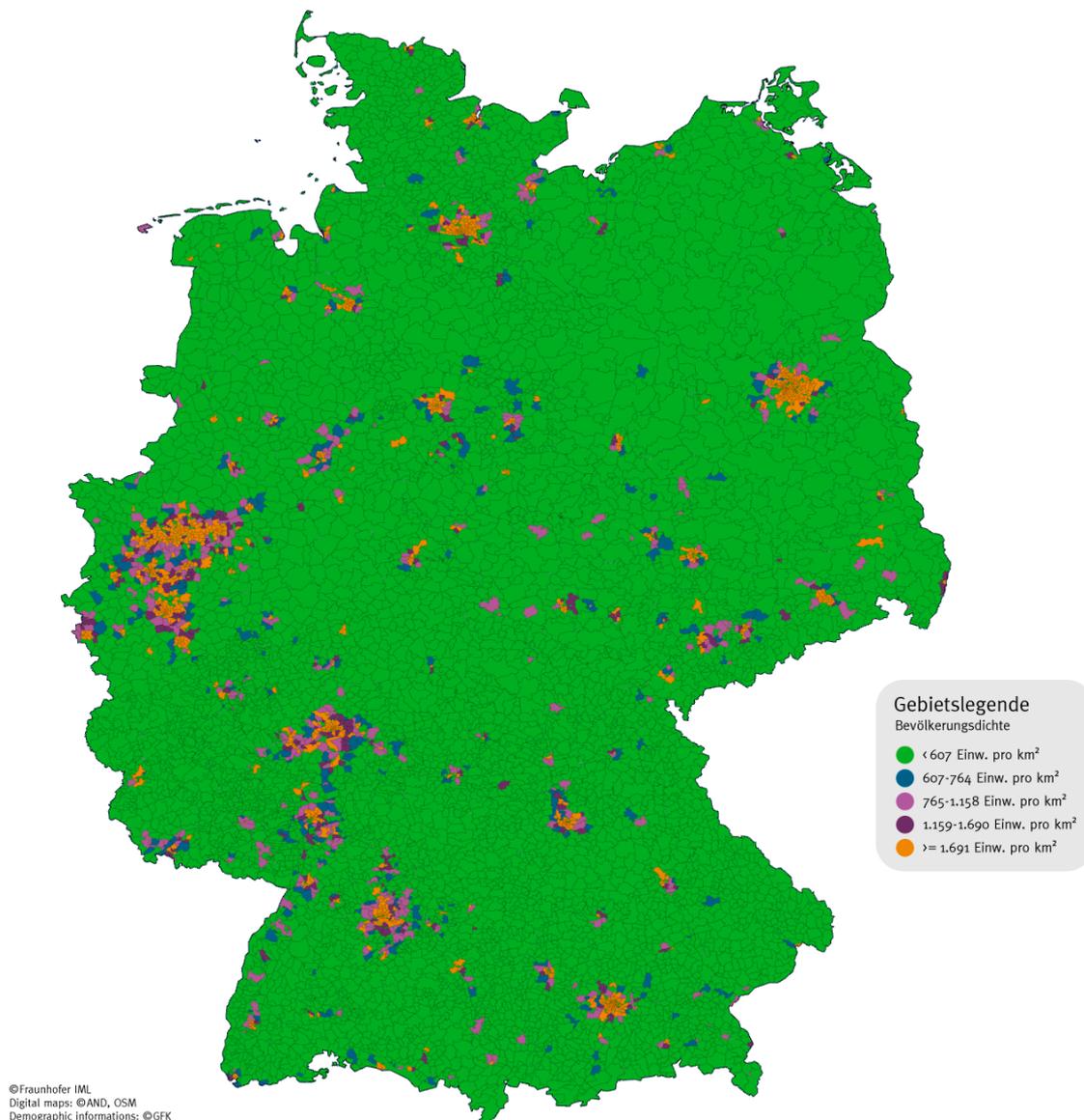
Quelle: RegioStaR - Regionalstatistische Raumtypologie für die Mobilitäts- und Verkehrsforschung (BMDV 2021)

Als urbaner Raum wurden folgende Raumtypen nach RegioStaR 17 ausgewählt (Destatis 2023a):

- 111 – Metropole – Bevölkerung je km² 2.881 (Stand 31.12.2022)
- 112 – Großstadt – Bevölkerung je km² 1.691 (Stand 31.12.2022)
- 113 – Mittelstadt - Bevölkerung je km² 765 (Stand 31.12.2022)
- 121 – Regiopole - Bevölkerung je km² 1.159 (Stand 31.12.2022)
- 211 – Zentrale Stadt - Bevölkerung je km² 607 (Stand 31.12.2022)

Für die Logistik sind bei der Planung von Tourgebieten und Touren in Deutschland nach wie vor die Postleitzahlengebiete eine wichtige Grundlage und viele Logistikkennzahlen beziehen sich auf diese geografische Unterteilung. Für die Betrachtung der urbanen Logistik wurden alle Postleitzahlengebiete ausgewählt, die über eine ausreichend hohe Einwohnerdichte nach den ausgewählten Raumtypen verfügen (vgl. Abbildung 29).

Abbildung 29: Urbane Räume nach RegioStaR



Quelle: Fraunhofer IML (Digital maps: AND, OSM; Demographic information: GFK)

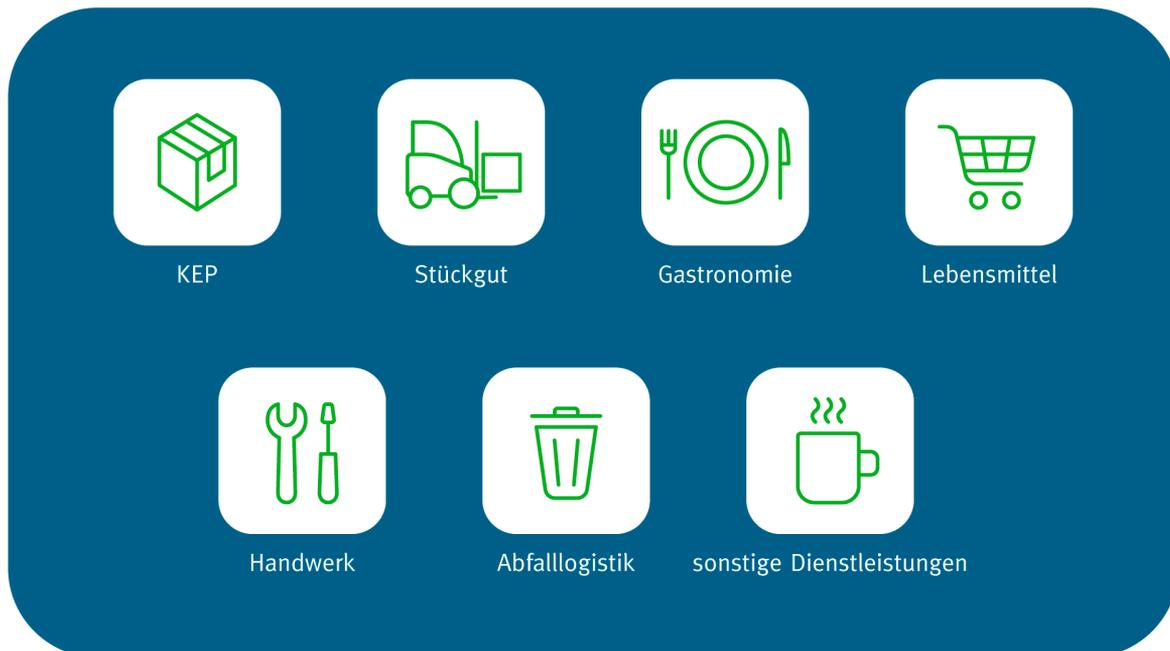
In Summe leben 39,5 Mio. Menschen in Deutschland im urbanen Raum. Das entspricht 47,5% der Gesamtbevölkerung.

2.1.2 Betrachtete Segmente

Der städtische Lieferverkehr ist ein Teil des Wirtschaftsverkehrs, welcher den Transport von Waren und Gütern in urbanen Räumen bzw. städtischen Gebieten beschreibt. Er wird in der Regel durch Lieferwagen, Lkw oder andere Fahrzeugtypen wie bspw. Kleinstfahrzeuge oder Lastenräder bedient. Zur Analyse des städtischen Lieferverkehrs liegen keine statistischen

Daten zu Transportmengen und -leistungen vor, da die Abgrenzung häufig fließend zum Wirtschaftsverkehr ist und keine allgemeingültige Methodik hierzu vorliegt. Im Rahmen dieser Studie wird daher ein Ansatz entwickelt, welcher einzelne, relevante Segmente des städtischen Lieferverkehrs jeweils für sich untersucht. Zur Abgrenzung dieser Segmente wird der Ansatz der Studie „Lieferrn ohne Lasten“ der Agora Verkehrswende zu Grunde gelegt. Diese werden auf Basis ihrer Fahrtzwecke in die sieben Segmente KEP, Stückgut, Gastronomie, Lebensmittel, Handwerk, Abfalllogistik und sonstige Dienstleistungen unterteilt (vgl. Abbildung 30).

Abbildung 30: Segmente des städtischen Güterverkehrs in Anlehnung an Agora Verkehrswende



Quelle: Fraunhofer IML in Anlehnung an Lieferrn ohne Lasten (Leerkamp, Bert et al. 2020)

In Anlehnung an die Definition der Agora Verkehrswende nach Marktsegmenten werden im Rahmen dieser Studie folgende Segmente des städtischen Lieferverkehrs definiert und im Folgenden näher untersucht.

- ▶ KEP = Kurier, Express und Paket
- ▶ Stückgut = Belieferung durch Logistikdienstleister (palettierte Güter)
- ▶ Lebensmittel = Belieferung von Supermärkten/Discountern
- ▶ Gastronomie = Belieferung von Restaurants, Imbissen, Kneipen usw.
- ▶ Handwerk = Handwerkerfahrten im urbanen Raum
- ▶ Abfalllogistik = Entsorgung im urbanen Raum

Die Segmentierung des städtischen Verkehrs ist in dieser Form zwar nicht trennscharf, ermöglicht aber die erste Aufnahme und Sammlung von Daten. Hierbei existiert bspw. kein Segment Einzelhandel, da dies die besondere Herausforderung besitzt, dass der Einzelhandel sowohl Anteile im KEP-Segment als auch im Stückgut- und Lebensmittel-Segment aufweist.

2.1.3 Vorgehen und betrachtete Umweltwirkungen

Detaillierte Informationen über die Verkehrs- bzw. Transportmengen und Umweltwirkungen der hier betrachteten Marktsegmente liegen für den urbanen Raum bisher nicht vor. Die im Folgenden beschriebenen Modellansätze stellen eine Annäherung dar, um Größenordnungen der ausgewählten Marktsegmente abzuschätzen. Zur Schaffung einer solcher Datenbasis wird ein neuer Ansatz verfolgt, indem zunächst im Rahmen einer Recherche öffentliche Datenquellen und Kennzahlen mit einem Fokus auf kommunaler Ebene bzw. städtischen Lieferverkehren entsprechend ihres Bezugs zu den ausgewählten Segmenten gesammelt und analysiert werden. Ziel ist es eine Datengrundlage zu schaffen, die es erlaubt eine Abschätzung des Transportaufkommens bzw. der Transport- und Fahrleistung je Segment je Einwohner*in des urbanen Raums zu geben. Auf Basis der in Kapitel 2.1.1 durchgeführten Abgrenzung des urbanen Raums kann auf diese Weise das abgeschätzte Transportaufkommen je Einwohner*in auf die gesamte Bevölkerung urbaner Räume hochgerechnet werden. Diese Methodik konnte auf die Marktsegmenten KEP, Stückgut Handwerk und Abfalllogistik in dieser Studie angewendet werden.

Für das Marktsegment Gastronomie führte dieser Ansatz aufgrund kaum bzw. nicht detailliert genug vorliegenden Daten zu keinen Ergebnissen. Hier wurde eine Methodik von (Kille 2010) angewendet, wonach das Güteraufkommen branchenspezifisch durch Verknüpfung amtlicher Statistiken abgeschätzt werden kann. Für das Marktsegment Lebensmittel führte weder der eine noch der andere Ansatz zu einem Ergebnis. Hierfür wäre eine Aktualisierung der Studie „Kraftverkehr in Deutschland“ (KiD) bzw. „Verkehr in Zahlen“ (ViZ) unter der Berücksichtigung der besonderen Anforderungen der urbanen Logistik eine Möglichkeit diese Zahlen zu erheben.

Die Bewertung der Umweltwirkungen erfolgt analog zu den Bewertungen in Kapitel 1 mit Hilfe des TREMOD-Modells, wobei durchschnittliche Emissionsfaktoren für den Innerortsverkehr mit dem Flottendurchschnitt des Jahres 2022 verwendet wurden (siehe Daten in A.5). Hierbei liegt der Fokus vor allem auf den THG-Emissionen. Die Luftschadstoffemissionen (NO_x und PM_{2,5}) wurden mangels genauerer Daten zur Flottenzusammensetzung und dem Fahrprofil der einzelnen Segmente nur näherungsweise bestimmt.

2.2 Kurier-, Express- und Paket (KEP)

2.2.1 Abgrenzung Marktsegment

Wesentliches Unterscheidungsmerkmal zum Segment Stückgut ist im KEP-Segment typischerweise das Sendungsgewicht und die Sendungsgröße. Es geht hauptsächlich um Pakete mit einem Gewicht, das ohne technische Hilfsmittel von einer Person gehandhabt werden kann. Im Postgesetz ist festgelegt, dass Pakete maximal 31,5 kg wiegen dürfen. Im Kurierbereich werden auch größere Abmessungen und Gewichte transportiert. Dieses Teilsegment ist insgesamt das kleinste und am individuellsten auf die Kundenwünsche zugeschnitten.

Empfänger der Sendungen sind Privatkunden oder Unternehmen. Die Versender-Empfänger-Beziehungen heißen dementsprechend Business-to-Consumer (B2C), Business-to-Business (B2B) und Consumer-to-Consumer (C2C).

Ein Kurierdienst zeichnet sich dadurch aus, dass in der Regel eine eilbedürftige Sendung direkt beim Versender abgeholt wird und mit oder ohne Zwischenumschlag an einem Terminal oder Hub zum Empfänger transportiert wird. Die Dienstleistung ist ebenso wie Express- und Paketdienst mit Tracking und Tracing ausgestattet und stellt in der Regel die hochpreisigste Dienstleistung des Segments da.

Auch bei Expressdiensten geht es vornehmlich um eilbedürftige Sendungen, hier sind verschiedene Service wählbar, zum Beispiel eine Zustellung am nächsten Tag vor 9 Uhr, vor 10 Uhr oder vor 12 Uhr. Der Transport erfolgt typischerweise mit Fahrzeugen der N1 Fahrzeugklasse, nur zwischen Terminals finden Hauptläufe mit größeren Fahrzeugen statt.

Die Paketdienste machen mengenmäßig und auch umsatzmäßig den größten Anteil dieses Segmentes aus. Auch hier ist eine Sendungsverfolgung Standard. Sendungen werden entweder bei Kunden abgeholt oder durch den Kunden in Paketshops oder Filialen eingeliefert. Es erfolgt eine Sammlung der Sendungen im Regionalverkehr zu Terminals oder Hubs, die im nächtlichen Hauptlauf, häufig mit Wechselbrückentransporten, verbunden sind. Vom Ziel-Hub erfolgt entweder eine direkte Zustellung zu den Kunden oder ein weiterer Regionalverkehr zu Zustellbasen oder Terminals, von denen aus die Transporte mit Fahrzeugen der Klasse N1 zu den Kunden durchgeführt werden. Im Paketbereich haben sich bereits verschiedene Methoden der alternativen Zustellung etabliert. Wenn Kunden an der Haustür nicht angetroffen werden, können Pakete in Paketshops oder in Paketzustellsysteme wie der Packstation zugestellt werden.

2.2.2 Fahr- und Verkehrsleistung

Ausgehend von 39,5 Millionen Einwohnern im urbanen Raum in Deutschland wird eine Paketmenge pro Jahr für den Untersuchungsraum ermittelt. Auf Basis von 30 Privatpaketen pro Jahr ergibt sich für das B2C-Segment eine Paketanzahl von rund 1,2 Milliarden Paketen pro Jahr, während sich bei 19 jährlichen B2B-Paketen pro Einwohner im urbanen Raum eine Gesamtsumme von rund 700 Millionen B2B-Paketen pro Jahr ergibt (BIEK 2021).

Im Businessbereich werden die Pakete hauptsächlich von Montag bis Freitag zugestellt, so dass 250 Zustelltage pro Jahr angenommen werden. Im B2C-Bereich wird regelmäßig auch am Samstag zugestellt; hier wurden 280 Zustelltage pro Jahr zu Grunde gelegt. Für B2C ergeben sich damit 4,2 Millionen Pakete pro Zustelltag, während es im B2B-Segment 2,8 Millionen Pakete pro Tag sind.

Die Zustellung im B2C-Bereich erfolgt hauptsächlich mit Fahrzeugen der Fahrzeugklasse N1, diese können im Durchschnitt am Tag 150 Pakete zustellen (Ibraheem Adeniran et al. 2023; NOW 2019). Im Bereich B2B werden zusätzlich in der Zustellung Lkw mit 7,5 Tonnen zulässiges¹² Gesamtgewicht eingesetzt (Fahrzeugklasse N2), die 450 Pakete pro Tour ausliefern (Annahme FhG IML nach (NOW 2019)). Für die Zustellung im urbanen Raum werden für den B2C-Bereich rund 28.700 Fahrzeuge am Tag eingesetzt. Im B2B-Bereich stellen 14.400 Fahrzeuge der Klasse N1 und 2.000 Fahrzeuge der Klasse N2 täglich zu (Berechnung FhG IML).

Für die Fahrleistung ist die durchschnittliche Entfernung zwischen den Stopps mit entscheidend. Projektdaten des Fraunhofer IML zeigen, dass im B2C-Bereich rund 300 m im urbanen Raum zwischen den Stopps zurückgelegt werden, während im B2B-Bereich der Wert für die Fahrzeuge der Klasse N1 bei 800 m und für die größeren Fahrzeuge (N2) bei 2.000 m liegt.

Ferner ist der Dropfaktor zu berücksichtigen; dieser gibt an, wie viele Pakete bei einem Empfänger je Zustellung durchschnittlich abgegeben werden. Im Privatbereich liegt der Dropfaktor bei 1,2 Paketen (Frankfurt UAS 2017). Im B2B-Bereich werden im Fahrzeugsegment N1 rund 3 Pakete (Tripp 2019) und im Fahrzeugsegment N2 rund 20 Pakete (Annahme FhG IML) zugestellt. Teilweise werden Empfänger nicht angetroffen; die Erstzustellquote liegt im B2C-Bereich bei 93% (80% Haustürzustellung und 13% Paketstationen und -shops) und im

¹² In UBA 2022c werden für das Basisszenario ähnliche Kennzahlen verwendet. Bei den gebildeten Szenarien liegt der Fokus auf der „Same-Day- und Instant-Delivery“ sowie auf der Zustellung von Lebensmitteln. Im Gegensatz zu dem Standardpaketsegment ergibt sich hier eine deutlich abweichende Stoppzeit und Stoppanzahl pro Tour.

B2B-Bereich bei 100% (Frankfurt UAS 2017), (BIEK 2017), (BIEK 2018) sowie (Kreis Melanie und Appel, Frank 2019).

Die Fahrgeschwindigkeit im Tourgebiet wirkt sich auf die Tourdauer aus. Daten aus Fraunhofer IML Projekten zeigen, dass diese für die KEP-Fahrzeuge im urbanen Raum durchschnittlich bei 15 km/h liegen. Es ergibt sich damit eine Fahrleistung pro Tour für die N1 Fahrzeuge von 53 bis 55 km und von 65 km für die N2 -Klasse (NOW 2019).

Die Anzahl Stopps variiert stark zwischen B2B und B2C. Für B2C erfolgen 109 Stopps pro Tour in der Klasse N1 (NOW 2019). Im B2B sind es rund 50 Stopps bei den kleineren Fahrzeugen und 25 Stopps bei den Klasse N2 Fahrzeugen (Annahme FhG IML).

Das durchschnittliche Gewicht eines Pakets liegt bei rund 5 kg (Bundesverband Paket und Expresslogistik e.V. 2023). Das Gesamtgewicht der transportierten Pakete pro Tour liegen in der Klasse N1 bei rund 0,75 Tonnen und in der N2-Klasse bei 2,5 Tonnen. Daraus ergeben sich pro Fahrzeug in der N1 Klasse rund 40 tkm pro Tour und 162 tkm in der N2-Klasse.

Von den insgesamt rund 130.000 Fahrzeugen im KEP-Bereich (NOW 2019) sind 77% aus der N1 Klasse (BIEK 2024). Der Fuhrpark der Paketdienstleister in Deutschland umfasst laut Unternehmensangaben aus der Branche ca. 30.000 batterieelektrisch betriebene N1 -Fahrzeuge (Reichel 2023). Es ist zwar davon auszugehen, dass von diesen 30.000 Fahrzeugen verhältnismäßig mehr im urbanen Raum eingesetzt werden, hierzu sind jedoch keine Daten verfügbar. Daher wird der Anteil an batterieelektrischen N1 Fahrzeuge im Einsatzgebiet „Urbaner Raum“ mit 30% angenommen. Im Bereich der N2 Fahrzeuge sind aktuell kaum batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge in Deutschland im Einsatz (N2/N3: <5.000 Fahrzeuge (EAFO 2024)). Für die batterieelektrischen N2 Fahrzeuge wird daher ein Wert von 0,5% angenommen.

Tabelle 26 zeigt einen Überblick der Kennzahlen im B2C und B2B-Bereich auf.

Tabelle 9: Kennzahlen B2B und B2C im Marktsegment KEP

Bezug	Kennzahl B2C	Kennzahl B2B	Quelle/Anmerkung
Einwohner im urbanen Raum	39.506.248		Ableitung RegioStaR, (Destatis 2023a)
Pakete pro Jahr und Einwohner	30	19	(BIEK 2021)
Pakete pro Jahr im urbanen Raum	1.204.940.564	770.371.836	Berechnung
Zustelltage	280	250	B2C mit Samstagszustellung
Pakete pro Tag im urbanen Raum	4.232.000	3.002.000	Berechnung
Pakete pro Fahrzeug N1	150		(NOW 2019), Annahme FhG IML
Pakete pro Fahrzeug N2		450	Annahme FhG IML
Benötigte Fahrzeuge N1	28.689	14.380	Berechnung

Bezug	Kennzahl B2C	Kennzahl B2B	Quelle/Anmerkung
Benötigte Fahrzeuge N2		2.054	Berechnung
Stoppentfernung Fahrzeug N1 [m]	300	800	Annahme FhG IML
Stoppentfernung Fahrzeug N2 [m]		2.000	Annahme FhG IML
Pakete pro Stopp Fahrzeug N1	1,2	3	(Frankfurt UAS 2017), Annahme FhG IML
Pakete pro Stopp Fahrzeug N2		20	Annahme FhG IML
Erstzustellquote Empfänger direkt [%]	80	100	(Frankfurt UAS 2017), (BIEK 2017)
Anteil Zustellung Paketstation, -shop [%]	13		(Kreis Melanie und Appel, Frank 2019), (BIEK 2018), Annahme FhG IML
Anzahl Stopps pro Tour Fahrzeug N1	109	50	(NOW 2019), Annahme FhG IML
Anzahl Stopps pro Tour Fahrzeug N2		23	Annahme FhG IML
Durchschnittliches Gewicht Paket [kg]	5,0	5,0	(BIEK 2023)

Entsprechend der Methodik ergeben sich hieraus die in Tabelle 10 ausgewiesenen Fahr- und Verkehrsleistungen für das Marktsegment KEP im urbanen Raum.

Tabelle 10: Fahr- und Verkehrsleistung im Marktsegment KEP

Fahrzeugklasse	Fahrleistung [km] gesamt	Fahrleistung [km] batterieelektrisch	Verkehrsleistung [tkm] gesamt	Verkehrsleistung [tkm] batterieelektrisch
Fahrzeuge N1 B2C	419.556.500	125.866.900	188.800.500	56.640.000
Fahrzeuge N1 B2B	192.659.000	57.798.000	86.696.500	26.009.000
Fahrzeuge N2 B2B	29.274.000	146.500	58.548.260	293.000

Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer IML

2.2.3 THG-Emissionen

Die Zustell Touren der KEP-Fahrzeuge finden in den hochbelasteten Verkehrszeiten statt und zeichnen sich durch viele Stopps bei den Empfängern und nur geringen Entfernungen zwischen den Stopps aus. Dieselmotorenverbrauch bei den N1 Fahrzeugen liegt bei 10,4 Liter auf 100km, bei den N2 Fahrzeugen bei 18,6 Litern. Die Well-to-Wheel THG-Emissionen der konventionellen

Dieselfahrzeuge betragen in Summe rund 161.100 Tonnen CO_{2e}. Der bereits hohe Anteil an batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen im KEP-Segment führt zu einer deutlichen Reduktion der THG-Emissionen.

Tabelle 11: THG-Emissionen (WTW) für das Marktsegment KEP (gerundet)

Kategorie	t CO _{2e} [Diesel]	t CO _{2e} [BEV]	t CO _{2e} [Summe]
N1	143.600	30.200	173.800
N2	17.500	50	17.550
Summe	161.100	30.250	191.350

Quelle: ifeu-Berechnungen, Emissionsfaktoren TREMOD 6.43.

2.2.4 Luftschadstoffe

Tabelle 12 zeigt die direkten Luftschadstoffemissionen für die eingesetzten Dieselfahrzeuge im KEP-Segment auf. Neben den Stickstoffoxiden (NO_x) werden noch die Feinstaubpartikel (PM) ausgewiesen. Da die Höhe der emittierten Luftschadstoffe sehr stark von dem individuelle Fahrverhalten und der detaillierten Flottenzusammensetzung (z.B. Euro 5, Euro 6, etc.) abhängt sind die ausgewiesenen Werte, da sie auf allgemeinen Hochrechnungen basieren, mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet.

Tabelle 12: Luftschadstoffe (TTW) für das Marktsegment KEP

Kategorie	t NO _x [Diesel]	t PM _{2,5} [Diesel]
N1	312	9
N2	60	1
Summe	372	10

Quelle: ifeu-Berechnungen, Emissionsfaktoren TREMOD 6.43.

2.2.5 Umweltwirkungen

Gerade im urbanen Raum sind freie Parkplätze und Ladebuchten für die Zustellfahrzeuge schwierig zu finden. Der Anteil der Haltevorgänge auf der Fahrbahn (zweite Reihe Parken) oder in Halteverbieten ist hier mit 8 von 10 Stopps besonders hoch (Frankfurt UAS 2017). Gerade das Halten in zweiter Reihe wirkt sich negativ auf den Verkehrsfluss aus. Die Belieferungszeiten der KEP-Dienste überschneiden sich vor allem morgens mit den Hauptverkehrszeiten der Ein- und Auspendler. Eine quantitative Auswertung der daraus resultierenden zusätzlichen Umweltbelastungen existiert nicht. In vielen Städten (z. B. Hamburg, Hannover, Mainz) werden derzeit Ladezonen für u. a. Paketfahrzeuge eingerichtet, um die Verkehrsflussstörungen zu reduzieren. Eine Mikrosimulation im Wiesbadener Stadtgebiet konnte den positiven Einfluss von Ladezonen nachweisen. Szenariorechnungen mit 100 Ladezonen in Wiesbaden ergaben für das Jahr 2030 eine Reduktion von 1,9 Tonnen NO_x (Stadt Wiesbaden 2020).

Die Zustellung von Paketen an Privathaushalte (B2C) verzeichnet in den letzten Jahren ein starkes Wachstum von durchschnittlich über +5% seit 2012. Der konjunkturelle Abschwung

führte 2022 erstmals zu einem Rückgang in diesem Segment (BIEK 2023). Der Auslieferverkehr in den Wohngebieten hat sich durch die Haustürzustellung deutlich erhöht. Dies führt zu einer deutlichen Lärmbelastung in den sensiblen Stadtgebieten (BBSR 2018).

Bei fast 15.000 Unfällen mit Personenschäden waren die Fahrer der Güterkraftfahrzeuge verantwortlich, rund 8.000 davon fallen in das Segment Kleinlaster (<3,5 t). 60% dieser Unfälle passierten innerhalb von Ortschaften (Destatis 2022). Eine Aufschlüsselung von Unfallzahlen mit KEP-Fahrzeugen ist nicht verfügbar.

2.3 Stückgut

2.3.1 Abgrenzung Marktsegment

Das Marktsegment Stückgut beinhaltet im Wesentlichen Lkw-Transporte zwischen Unternehmen. Sendungen an Privatpersonen kommen nur in Einzelfällen vor. Stückgut hat eine typische Sendungsgröße von einer Palette bis zu wenigen Lademetern. Größere Sendungen, die mehrere Lademeter bis zu einer Full-Truck-Load (FTL) beinhalten, werden als Teilladungs- oder Komplettladungs-Geschäft bezeichnet.

Stückgut kann in der Regel nicht ohne Hilfsmittel umgeschlagen werden; klassisch sind hierbei der Gabelhubwagen oder Gabelstapler. Die Fahrzeuge haben eine typische zulässige Gesamtmasse von 7,5 bis maximal 40 Tonnen, wobei speziell im urbanen Raum die Klasse 7,5 bis 26 Tonnen den größten Anteil der Fahrzeuge ausmacht. Die Transportabwicklung ist ähnlich dem KEP-Segment. Sendungen werden im Laufe des Tages bei Versendern abgeholt und zur Speditionshalle gebracht. Von dort werden die Sendungen auf Abgangsrelationen sortiert und z. B. im Nachtsprung in die Zielregion transportiert. Diese Transporte finden mit Wechselbrücken oder mittels Sattelaufleger statt. Teilweise wird auch die Schiene genutzt.

2.3.2 Fahr- und Verkehrsleistung

Für das Segment Stückgut kann in Deutschland von einer Jahresmenge (2020 / 2021) von rund 120 Millionen Sendungen ausgegangen werden (Lohre, Dirk et al. 2021). Während der Coronazeit gab es hierbei Abweichungen von den Vorjahresmittelwerten, welche sich aber mittlerweile wieder normalisiert haben. Basierend auf einer Einwohnerbetrachtung für den urbanen Raum ergeben sich rund 57 Millionen Sendungen pro Jahr im urbanen Raum, wobei der überwiegende Teil der Sendungen an Unternehmen zugestellt wird. Aus diesem Grund kann von 250 Zustelltagen pro Jahr ausgegangen werden.

Der Fuhrpark im Bereich Abholung und Zustellung der Stückgutlogistik kann mit den Lkw-Klassen bis 3,5 Tonnen, bis 7,5 Tonnen, bis 12 Tonnen, bis 18 Tonnen und bis 40 Tonnen abgebildet werden (Lohre, Dirk et al. 2021). Den größten Anteil haben hierbei Fahrzeuge mit 12 Tonnen zGG, die an 60% der Transporte für Abholung und Zustellung beteiligt sind. Auf Platz zwei liegt der 40-Tonnen-Lkw mit 21% Anteil. Platz drei nimmt der 7,5-Tonnen-Lkw ein, der aktuell bei 10% Anteil liegt. Beim 7,5-Tonnen-Lkw ist zu bedenken, dass aufgrund Änderungen der Maut-Belastung hier in Zukunft von einem geringen Prozentsatz auszugehen ist, da der 7,5-Tonnen-Lkw mauttechnisch nicht mehr bevorzugt werden wird (Lohre, Dirk et al. 2021).

Es wird daher erwartet, dass die Transportanteile des 7,5-Tonnen-Lkw zukünftig zumindest in Teilen auf den 12 Tonnen Lkw übergehen werden. Die Fahrzeuge haben jeweils unterschiedliche Palettenkapazitäten; diese reichen von ca. 5 Paletten beim 3,5-Tonnen-Lkw über 15 Paletten beim 7,5-t-Lkw, 17 Paletten beim 12-t-Lkw und 18-t-Lkw und 34 Paletten beim 40-Tonnen-Lkw (Lohre, Dirk et al. 2021).

Die Touren werden üblicherweise als kombinierte Zustell- und Abholtouren gefahren. Am Beginn des Tages werden vornehmlich Sendungen zugestellt und im Laufe des Tages werden dann vermehrt Sendungen bei Kunden abgeholt, so dass das Fahrzeug am Ende der Tour mit Sendungen aus der Fläche zurückkehrt. Im Segment Stückgut werden überwiegend B2B-Kunden bedient; im Vergleich zum Segment KEP ist die Dichte der Kunden in der Fläche wesentlich geringer und es ergibt sich eine längere Distanz zwischen den Stopps. Im Modell wurde mit 12,5 km durchschnittlicher Stoppentfernung inklusive Anfahrt ins Tourgebiet kalkuliert.

Je nach Fahrzeuggrößen liegen unterschiedliche Drop-Faktoren vor, das heißt die Anzahl Paletten, die an einem Stopp abgeladen werden. Für die Klassen 7,5-Tonnen, 12-Tonnen und 18-Tonnen liegt dieser Wert bei zwei Paletten im Schnitt. Für die Abholung wurde mit einem höheren Faktor gerechnet; dieser liegt für den Klassen 7,5-t, 12-t und 18-t bei drei Paletten und beim 40-Tonnen-Lkw bei 8 Paletten¹³.

Auf Basis von aktuellen KBA-Zulassungsdaten wurden Anteile für E-Fahrzeuge hinterlegt. Bei der Klasse 3,5-Tonnen liegt dieser Wert bei 2%, in der Klasse bis 7,5-t bei 1,19% und darüber zwischen 0,01% und 0,03% (KBA 2022).

Basierend auf einer Durchschnittsfahrgeschwindigkeit und Stoppzeit, die von der Anzahl umgeschlagenen Paletten abhängt, ergeben sich Tour-Längen für die 12-Tonnen-Lkw und 18-Tonnen-Lkw von rund 200 km. Die Anzahl Stopps liegt zwischen 10,6 und 12,8 Stopps pro Tour.

Tabelle 13: Kennzahlen im Marktsegment Stückgut

Bezug	Kennzahl	Quelle/Anmerkung
Anteil Sendungen im urbanen Raum (Abholung und Zustellung)	48%	Ableitung RegioStaR (Destatis 2023a), (Lohre, Dirk et al. 2021)
Sendungen in Deutschland	120.000.000	(Lohre, Dirk et al. 2021)
Zustelltage	250	B2B ohne Samstagszustellung
Palettenstellplätze pro Fahrzeug N1	5	(Lohre, Dirk et al. 2021)
Palettenstellplätze pro Fahrzeug N2	15 - 17	(Lohre, Dirk et al. 2021)
Palettenstellplätze pro Fahrzeug N3	17 - 34	(Lohre, Dirk et al. 2021)
Dropfaktor Abholung und Zustellung Fahrzeug N1	0,5 – 1	Annahme FhG IML
Dropfaktor Abholung und Zustellung Fahrzeug N2	2 – 3	Annahme FhG IML
Dropfaktor Abholung und Zustellung Fahrzeug N3	2 - 8	Annahme FhG IML
Anteil Sendungsmenge mit Fahrzeugen Klasse N1	2,5%	(Lohre, Dirk et al. 2021)

¹³ Die Parameter basieren auf Expertengesprächen und Projekterfahrungen des Fraunhofer IML

Bezug	Kennzahl	Quelle/Anmerkung
Anteil Sendungsmenge mit Fahrzeugen Klasse N2	70%	(Lohre, Dirk et al. 2021)
Anteil Sendungsmenge mit Fahrzeugen Klasse N3	27,5%	(Lohre, Dirk et al. 2021)
Tourlänge	rd. 200 km	Annahme FhG IML, Expertengespräche
Anzahl Stopps pro Tour	10,6 – 12,6	Annahme FhG IML, Expertengespräche

In Tabelle 14 sind die Fahrleistungen und Verkehrsleistungen in den Nutzfahrzeugklassen N1, N2 und N3 dargestellt. Die Anteile an elektrischen Fahrzeugen entsprechen den Anteilen laut Kraftfahrtbundesamt Zulassungsstatistik. Insbesondere in den Klassen N2 und N3 sind die Werte entsprechend noch sehr gering.

Die Hauptfahrleistung und auch die Hauptverkehrsleistung wird in der Klasse N2 erbracht.

Tabelle 14: Fahr- und Verkehrsleistung im Marktsegment Stückgut

Fahrzeugklasse	Fahrleistung (km)	Verkehrsleistung (Tonnen x km)	Davon elektrisch angetrieben
N1	76.230.166	103.673.025	2%
N2	604.085.579	2.745.014.130	< 1%
N3	139.243.310	1.029.571.140	< 1%

Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer IML

2.3.3 THG-Emissionen

Im Segment Stückgut erfolgt der Großteil Fahrleistung in der Fahrzeugkategorie N2. Dementsprechend ist in dieser Kategorie auch der höchste Beitrag an THG-Emissionen zu verzeichnen. Die Kategorie N3 liegt an zweiter Stelle und die Kategorie N1 verursacht aufgrund der geringen Fahrleistungen die niedrigsten THG-Emissionen.

Der Anteil der batterieelektrischen Fahrzeuge ist momentan im Bereich Stückgut noch sehr gering, so dass für diese Antriebsart insgesamt vergleichsweise sehr geringe THG-Emissionen anfallen. In Tabelle 15 sind die Well-to-Wheel THG-Emissionen des Segments je Fahrzeugklasse dargestellt.

Tabelle 15: THG-Emissionen (WTW) für das Marktsegment Stückgut (gerundet)

Kategorie	t CO _{2e} [Diesel]	t CO _{2e} [BEV]	t CO _{2e} [Summe]
N1	25.035	251	25.285
N2	350.722	276	350.998
N3	169.033	30	169.063
Summe	544.789	557	545.346

Quelle: ifeu-Berechnungen, Emissionsfaktoren TREMOD 6.43.

2.3.4 Luftschadstoffe

Die direkten Luftschadstoffemissionen für das Marktsegment Stückgut werden in Tabelle 16 dargestellt. Stickstoffoxide (NO_x) und Auspuffpartikel (PM) für Dieselantriebe sind aufgeführt, während der batterieelektrische Antrieb aufgrund seiner lokalen Emissionsfreiheit nicht berücksichtigt wird.

Tabelle 16: Luftschadstoffe (TTW) für das Marktsegment Stückgut

Kategorie	t NO _x [Diesel]	t PM _{2,5} [Diesel]
N1	54	2
N2	1.231	19
N3	315	4
Summe	1.601	24

Quelle: ifeu-Berechnungen, Emissionsfaktoren TREMOD 6.43.

2.3.5 Umweltwirkungen

Neben den THG-Emissionen gibt es auch weitere Umweltwirkungen wie Lärm und Verkehrsbelastungen für bspw. städtische Wohnquartiere. Die Stückgutbranche ist größtenteils mit den Fahrzeugklassen N2 und N3 ausgestattet. In diesen Klassen gibt es aktuell nur ein sehr geringes Angebot an alternativ betriebenen Fahrzeugen im Vergleich zum Dieselfahrzeug.

Die Fahrzeuge verfügen häufig über eine Ladebordwand. Deren Nutzung in Kombination mit den größeren Sendungen bedingt eine längere Stoppzeit als im KEP-Segment. Dafür ist die Anzahl Stopps aber auch deutlich geringer. Beim Parken in zweiter Reihe tritt somit auch aufgrund der größeren Fahrzeuge eine stärkere Verkehrsstörung auf. Allerdings ist Parken in der zweiten Reihe sehr viel seltener als im Segment KEP, da die Kunden bzw. Empfänger zum überwiegenden Teil B2B-Kunden sind und dort in der Regel auf eigenen Parkplätzen oder Innenhöfen gefahren und gehalten wird.

2.4 Gastronomie

2.4.1 Abgrenzung Marktsegment

Im Segment der Gastronomie wird die Belieferung gastronomischer Betriebe mit Lebensmitteln und Verbrauchsmaterialien betrachtet. Gastronomiebetriebe sind vielfältig, so betreiben bspw. Unternehmen der Systemgastronomie wie beispielsweise McDonald's, Burger King, Ikea-Restaurants weitgehend standardisierte Restaurants. Ferner gibt es Kantinen, klassische Speiserestaurants, Cafés, Imbisse sowie in Zukunft eventuell auch rein auf die Lieferung zum Endkunden spezialisierte gastronomische Betriebe.

Gastronomische Betriebe befinden sich sowohl in Gewerbegebieten als auch im Innenstadtbereich wie z. B. innerhalb von Fußgängerzonen, was die Anliefersituation teils sehr heterogen macht. Speziell Systemgastronomen haben in der Vergangenheit darauf geachtet, über eine gute Anliefersituation zu verfügen, gleichzeitig gibt es aber auch schwierige Anliefersituationen, wie in Bahnhöfen oder Fußgängerzonen.

Trotz dieser Heterogenität ist die Gastronomie durch zwei Merkmale gekennzeichnet:¹⁴

- 1.) Im urbanen Raum sind Gastronomiebetriebe durchschnittlich etwa 50% größer als Betriebe außerhalb des urbanen Raums. Dies ist kein Spezifikum der Gastronomie, sondern zeigt sich auch bei Betrachtung von Betrieben aller Branchen.
- 2.) Verglichen mit den übrigen Branchen sind Betriebe der Gastronomie hinsichtlich der Anzahl der Mitarbeitenden jedoch im Durchschnitt weniger als halb so groß.

Der Umstand, dass es sich typischerweise um Kleinstunternehmen handelt, die verderbliche Ware verarbeiten, legt nahe, dass nur begrenzt Vorratshaltung betrieben wird, so dass von einer hochfrequenten Belieferung von Gastronomiebetrieben auszugehen ist. Hotellerie- und Gastronomiebetriebe werden durchschnittlich 5,3-mal pro Woche und damit häufiger als Filialen des Einzelhandels beliefert (Eidhammer et al. 2016). Weitere Kennwerte aus der Praxis dazu liegen kaum vor.

Die eingesetzten Fahrzeuge verteilen sich auf sämtliche Größenklassen des verfügbaren Fahrzeugspektrums, wobei Fahrzeuge ab 26t (inkl. Sattelzüge) etwas stärker vertreten sind, was sich aus den teils hohen Ladungsgewichten, bspw. in der Getränke Logistik, erklärt. Bei der Auslieferung an Endkunden finden sich E-Bikes, E-Roller, Pkw sowie kleine Lieferwagen, die deutlich kleinere und leichtere Ladungen im Nahbereich verteilen.

2.4.2 Fahr- und Verkehrsleistung

Bestimmung des Transportaufkommens

Eine separate Darstellung zu Transportaufkommen, Fahr- und Verkehrsleistung mit ausdrücklichem Bezug zur Gastronomie findet sich in amtlichen Statistiken nicht. Jedoch wurde von (Kille 2010) eine Methode entwickelt, das Güteraufkommen branchenspezifisch durch Verknüpfung amtlicher Statistiken abzuschätzen. Diesem Verfahren folgend wurden zunächst anhand von Informationen zur volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung¹⁵ die 30 bedeutendsten Inputs identifiziert, die von der Gastronomie als Vorleistungen bezogen werden. Diese stellen 97% des Werts eingesetzter Vorleistungen dar. Innerhalb dieser 30 Kategorien finden sich

¹⁴ Unter dem Begriff der Betriebsgröße wird hier die Zahl der Vollzeitbeschäftigten verstanden. Grundlage der Aussagen bilden Auswertungen der Unternehmensdemographie-Datenbank von EUROSTAT (bd_salge_1_nace).

¹⁵ Genauer: „Input-Output-Tabelle (Revision 2019), inländische Produktion zu Herstellungspreisen“. Daten des Jahres 2023 waren noch nicht verfügbar, sodass gütergruppenscharf über die Jahre 2015 bis 2019 eine lineare Regression durchgeführt und die Werte für 2023 interpoliert wurden.

lediglich zwei, die nicht reine Dienstleistungen darstellen und damit als Ursache für Güterverkehre betrachtet werden können. Dabei handelt es sich um die Gütergruppen „Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse“ (mit einem Wertanteil 15% die wichtigste Kategorie an Vorleistungen) sowie „Erzeugnisse der Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen“ (Wertanteil ca. 1%). Zur Überführung der Wert- in Mengengrößen wurden Produktions- und die Außenhandelsstatistik verwendet. Die Produktionsstatistik bietet detaillierte Angaben zu Wert und Menge unterschiedlicher Güterarten an. Für Nahrungsmittel und Tabakerzeugnisse wurden hier die Datenfelder „Wert der zum Absatz bestimmten Produktion“ und „Gewicht der zum Absatz bestimmten Produktion“ genutzt, um über die enthaltenen Güterarten das typische Wert-Gewicht-Verhältnis (Wertdichte) zu bestimmen. Dieser Kennwert erlaubte die Konvertierung der Wertgröße „Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse“ von volkswirtschaftlichen Wert- in logistische Transportaufkommensgrößen.¹⁶ Analog wurde für die Gütergruppe „Erzeugnisse der Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen“ verfahren, deren Wertdichte mithilfe der Außenhandelsstatistik bestimmt werden konnte (Datenfelder „Ausfuhr: Gewicht t“ und „Ausfuhr: Wert Tsd. EUR“). Die Plausibilität der ermittelten Gesamttonnage wurde anhand des für Deutschland von (Eurostat 2023a) ausgewiesenen Gesamtaufkommens an Lebensmittelabfällen geprüft.

Bestimmung des regionalen Transportaufkommens

Anhand kreisgenauer Angaben zur Wertschöpfung in der Gastronomie konnte das zuvor aus Wertgrößen für Gesamtdeutschland bestimmte Güteraufkommen auf die NUTS3-Ebene abgebildet werden (Statistisches Bundesamt 2022). Hierzu wurden die Mengen entsprechend des Verhältnisses der lokalen zur bundesdeutschen Gesamtwertschöpfung geschlüsselt.

Bestimmung plausibler Transportrelationen

Das bundesdeutsche Marktgeschehen für Logistikdienstleistungen mit Bezug zu Lebensmitteln und Kühlware wird im Wesentlichen von den Unternehmen „Kraftverkehr Nagel“, „Dachser“, „Nordfrost“, „Havi“, „pfenning group“ sowie „Ludwig Meyer“ bestimmt. Daher wurden zunächst die Standorte dieser Unternehmen (wenn möglich nur mit Frische-Logistik-Bezug) recherchiert und ihr Standort gemäß Postadresse dem jeweiligen Landkreis zugeordnet, der der Einfachheit halber durch seinen geographischen Mittelpunkt (Zentroid) repräsentiert wird. Für alle Landkreise wurde der geographisch nächstliegende Kreis bestimmt, in dem sich mindestens ein Standort eines der genannten Frische-Logistiker befindet. Damit existierte für jeden Landkreis genau eine (fiktive) Belieferungsrelation für die Gastronomie sowie eine konkrete Entfernung (schnellste Straßendistanz zwischen den Zentroiden der Kreise). Als fiktive Distanz innerhalb eines Landkreises wurde der Radius eines Kreises angenommen, dessen Fläche genau der des jeweiligen Landkreises entspricht. So wurde vermieden, dass die Belieferung aus demselben Landkreis nicht mit einer Distanz von 0 behandelt worden wäre. Die Auswertungen betrachten daher die Belieferungsströme nur zwischen einem Landkreis und der geographisch am günstigsten liegenden Möglichkeit zur Versorgung mit frischen Lebensmitteln durch ein Logistikunternehmen. Davor liegende Teile der Transportkette werden nicht abgebildet.

Bestimmung der jährlichen Fahrten mit Gastronomiebezug und der mittleren Menge je Fahrt auf Kreisebene

Die kreisbezogene Transportstatistik von EUROSTAT (Eurostat 2023b) wurde herangezogen, um mithilfe der zuvor auf Kreisebene disaggregierten Mengen die Fahrten mit

¹⁶ Relevante Güterarten der Produktionsstatistik; Nahrungsmittel (GP19-101111403 bis GP19-119999000 sowie Tabakerzeugnisse (GP19-120011304 bis GP19-129999000).

Gastronomiebezug zu schätzen. Es musste angenommen werden, dass sich Mengen und Fahrten in der Gastronomie im selben Verhältnis aufteilen, wie in dem vorliegenden Datensatz. Damit lagen für jeden Kreis Mengen vor, die über ganz Deutschland und ebenso aufgeteilt nach „urbaner Raum“ und „nicht-urbaner Raum“ aggregiert wurden.

Bestimmung von Fahr- und Verkehrsleistung pro Kreis und insgesamt

Die Ermittlung der Fahrleistung der Belieferungsfahrten pro Kreis (NUTS3) erfolgt unter Nutzung eines von (Daganzo 1984) entwickelten Verfahrens unter Annahme von 52 Wochen pro Jahr. Dazu wurden die folgenden Symbole definiert:

- ▶ $k = 1, \dots, K$ Index der Kreise (NUTS3)
- ▶ d_k^{FL} Entfernung zum nächstgelegenen Frische-Logistik-Zentrum für Kreis k . Dieser Wert wurde bei der Bestimmung der Transportrelationen festgelegt.
- ▶ h_k Anzahl Gastronomie-Betriebe Kreis k . Diese Daten stellt die EUROSTAT-Statistik „Employer business demography by NACE Rev. 2 activity and NUTS 3 regions“ (bd_salge1_nace_r) bereit.
- ▶ A_k Fläche Kreis k . Diese geographischen Daten sind als Ergänzung der NUTS-Klassifikation erhältlich.
- ▶ s_{woche} Stopps pro Woche pro Betrieb. Hier wurde ein Wert von 5,3 Anlieferungen pro Woche angenommen, was im Einklang mit den Erhebungen von (Eidhammer et al. 2016) sowie (Gil und Sánchez-Díaz 2017) steht.
- ▶ b Beardwood-Schätzer für Turlängen. Eine technische Größe zur Approximation von Belieferungstouren. In Anlehnung an (Arlotto und Steele 2016) wurde konservativ ein Wert von 0,765 gewählt.
- ▶ n_k Anzahl Fahrten pro Jahr im Kreis k .
- ▶ d_k^{Jahr} Jahresfahrleistung für Kreis k . Eine der abzuschätzenden Gesamtgrößen.
- ▶ p_k^{Jahr} Jahresverkehrsleistung für Kreis k . Eine der abzuschätzenden Gesamtgrößen.

In Anlehnung an (Daganzo 1984) bestimmt sich für jeden Landkreis k nun die jährliche Fahrleistung wie folgt:

$$d_k^{Jahr} = \left(2 \cdot d_k^{FL} + b \sqrt{A_k \cdot h_k \cdot s_{woche}} \right) \cdot 52$$

Dieses Vorgehen unterstellt, dass sich die Gastronomiebetriebe gleichmäßig über die Fläche des Landkreises verteilen.

Für die Verkehrsleistung wurden die zuvor bestimmten Transportmengen je Kreis gleichmäßig auf die zu bedienenden Gastronomiebetriebe des Kreises aufgeteilt. Eine durchschnittliche Belieferungstour beginnt demnach mit der gesamten Menge der zu bedienenden Betriebe und verringert sich nach der Bedienung eines Betriebs um die durchschnittliche Belieferungsmenge pro Betrieb, sodass das Fahrzeug bei Rückkehr zum Ausgangspunkt als leer angenommen wird.

Als Schätzformel für die Verkehrsleistung ergibt sich:

$$p_k^{Jahr} = n_k^{\square} \cdot d_k^{FL} + d_k^{Jahr} \cdot \frac{1}{2 \cdot n_k^{\square}} \left(\cdot h_k^{\square} \cdot s_{\square}^{woche} \cdot 52 \right)^2$$

Abschließend lagen für jeden Kreis Fahr- und Verkehrsleistung en vor, die über ganz Deutschland und ebenso aufgeteilt nach „urbaner Raum“ und „nicht-urbaner Raum“ aggregiert wurden.

Bestimmung der eingesetzten Fahrzeugflotte nach Gewichtsklassen

Die vom KBA bereitgestellte Bestandsstatistik nach technischen Daten (KBA 2022) beinhaltet eine Aufteilung der in Deutschland im gewerblichen Einsatz befindlichen Nutzfahrzeuge nach zulässiger Gesamtmasse und Nutzlastklasse.¹⁷ Die Fahrten der Fahrzeugklassen wurden durch einen Kleinste-Quadrate-Ansatz ermittelt. Alle Fahrten eines Kreises wurden auf alle Fahrzeugklasse sowie mögliche Leerfahrten derart aufgeteilt, dass die Gesamtmenge durch die Gesamtnutzlast der Fahrten beförderbar war und die pro Kreis ermittelte Durchschnittstonnage pro Kreis resultierte.

Aufteilung des Mengenaufkommens, der Fahr- und Verkehrsleistung auf die Fahrzeugklassen

Proportional zu den im vorherigen Schritt bestimmten Fahrten je Fahrzeugklasse wurde die insgesamt pro Kreis berechnete Fahrleistung auf die Fahrzeugklassen geschlüsselt. Die Aufteilung des Mengenaufkommens erfolgte über das Verhältnis der pro Fahrzeugklasse in einem Kreis insgesamt vorhandenen maximalen Nutzlast zur maximalen Gesamtnutzlast der Fahrten dieses Kreises. Im Verhältnis der Produkte aus berechneten Fahrleistungen und Tonnagen der Fahrzeugklassen wurden schlussendlich die für einen Kreis bestimmte Gesamtverkehrsleistung verteilt.

Zusammenführung der Gesamtergebnisse

Durch die Einteilung der einzelnen Kreise in urbane und nicht-urbane Gebiete konnten die auf Kreisebene bestimmten Werte nach Fahrzeugkategorien und den urbanen Raum insgesamt aggregiert werden. Diese Ergebnisse zeigt Tabelle 17.

¹⁷ Bei Fahrzeugen mit einer Nutzlast von über 9t enthalten die KBA-Daten keine Obergrenze. Diese wurden wie folgt auf Grundlage echter Fahrzeugdaten von Truckscout24.de wie folgt definiert (zGM Fahrzeug, maximale Nutzlast): 10t, 5t; 12t, 6t; 14t, 7t; 16t, 8t; 18t, 9t; 20t, 10t; 22t, 11t; 24t, 12t; 26t, 14t; über 26t und Sattelzüge, 16t

Tabelle 17: Mengenaufkommen, Fahr- und Verkehrsleistung im Marktsegment Gastronomie

Fahrzeugklasse	Transportaufkommen [t]	Fahrleistung [km]	Verkehrsleistung [tkm]	Davon elektrisch angetrieben
bis 7,5t	96.074	1.223.552	1.113.433	1,2%
über 7,5t bis 12t	176.503	1.085.530	1.707.276	< 1%
über 12t bis 14t	204.653	1.072.421	1.964.416	< 1%
über 14t bis 20t	250.218	1.050.095	2.421.055	< 1%
über 20t bis 26t	353.369	983.499	4.024.964	< 1%
über 26t bis 28t	399.529	961.175	5.191.765	< 1%
Sattelzüge	1.668.916	2.535.688	35.217.452	< 1%
Gesamt	3.149.263	8.911.961	51.640.361	

Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer IML

2.4.3 THG-Emissionen

Die im Marktsegment Gastronomie eingesetzten Fahrzeuge verteilen sich auf sämtliche Größenklassen des verfügbaren Fahrzeugspektrums. Der Anteil an Fahrzeugen ab 26 t ist bedingt durch die teils hohen Ladungsgewichte, bspw. in der Getränkelogistik, etwas stärker vertreten. Aufgrund der gewählten Methodik werden wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben nur die Belieferungsströme zwischen einem Landkreis und der geographisch am günstigsten liegenden Möglichkeit zur Versorgung mit frischen Lebensmitteln durch ein Logistikunternehmen betrachtet. Davor liegende Teile der Transportkette werden nicht abgebildet. In Tabelle 18 sind die Well-to-Wheel THG-Emissionen des Marktsegments je Fahrzeugklasse entsprechend dieser Auswertung dargestellt.

Tabelle 18: THG-Emissionen (WTW) für das Marktsegment Gastronomie (gerundet)

Fahrzeugklasse	t CO _{2e} [Diesel]	t CO _{2e} [BEV]
bis 7,5t	600	3,6
über 7,5t bis 12t	700	0,0
über 12t bis 14t	700	0,1
über 14t bis 20t	900	0,1
über 20t bis 26t	1.000	0,1
über 26t bis 28t	1.100	0,1
Sattelzüge	3.700	0,2
Gesamt	8.700	4,3

Quelle: ifeu-Berechnungen, Emissionsfaktoren TREMOD 6.43.

2.4.4 Luftschadstoffe

In der Tabelle 19 sind die direkten Luftschadstoffemissionen für das Marktsegment Gastronomie ausgewiesen. Hierbei werden neben den Stickstoffoxiden (NO_x) noch die Auspuffpartikel (PM) für die dieselbetriebenen Fahrzeuge ausgewiesen, wobei eine gewisse Ungenauigkeit anzunehmen ist, da sowohl das individuelle Fahrverhalten als auch die genaue Flottenzusammensetzung (z. B. Euro 5, Euro 6) des Marktsegments nicht bekannt ist. Der batterieelektrische Antrieb entfällt, da er lokal emissionsfrei ist.

Tabelle 19: Luftschadstoffe (TTW) für das Marktsegment Gastronomie

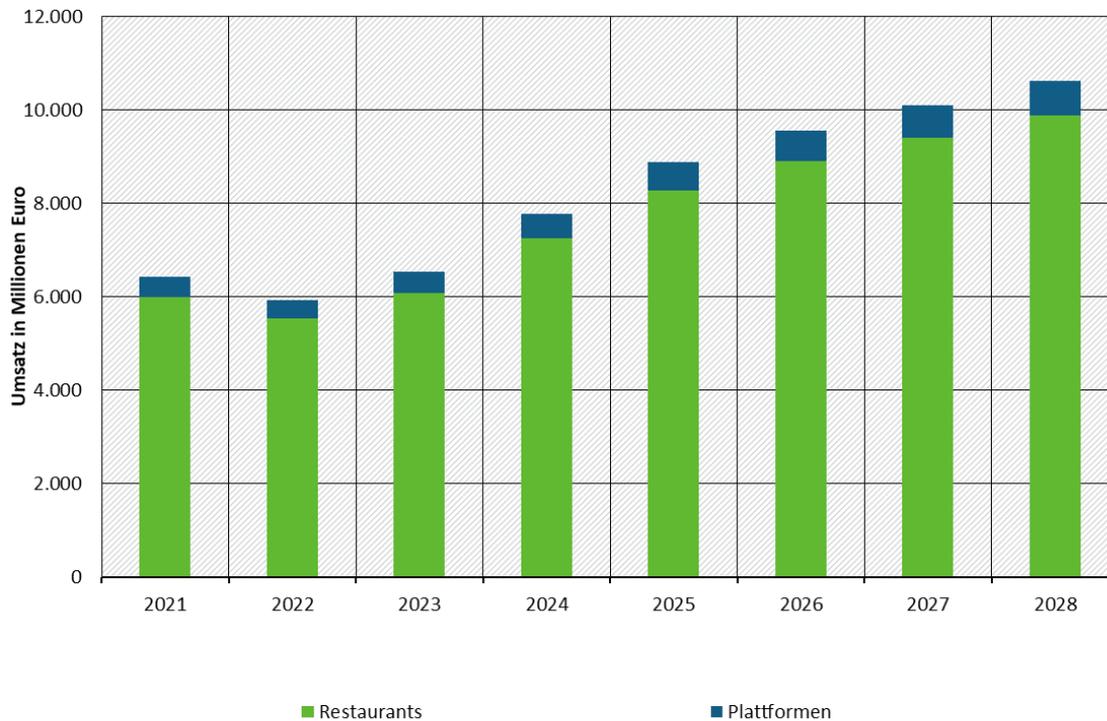
Kategorie	t NO _x [Diesel]	t PM _{2,5} [Diesel]
bis 7,5t	2,3	0,05
über 7,5t bis 12t	2,2	0,03
über 12t bis 14t	1,5	0,03
über 14t bis 20t	2,7	0,03
über 20t bis 26t	3,2	0,02
über 26t bis 28t	2,4	0,02
Sattelzüge	5,2	0,06
Summe	19,5	0,25

Quelle: ifeu-Berechnungen, Emissionsfaktoren TREMOD 6.43.

2.4.5 Umweltwirkungen

Neben der klassischen Gastronomie hat in den letzten Jahren vor allem die Anzahl der Onlinebestellungen bei Restaurants und Lieferdiensten bzw. auf Plattformen in Deutschland stark zugenommen (vgl. Abbildung 31).

Abbildung 31: Prognose der Umsätze für Onlinebestellungen in Deutschland



Quelle: (Statista 2023)

Hierdurch ergibt sich ein höheres Verkehrsaufkommen an Lieferfahrzeugen – meist in Form von Pkw, Kleinstfahrzeugen oder Rollern. Für eine schnelle Zustellung wird hier meist in zweiter Reihe oder auf Radwegen gehalten, was neben dem höheren Lieferverkehrsaufkommen auch zu negativen Auswirkungen auf den Verkehrsfluss führt. Des Weiteren führt die steigende Anzahl an Onlinebestellungen gleichzeitig zu einem höheren Verbrauch von Serviceverpackungen in der Gastronomie (UBA 2023d). Zwar ist in den letzten Jahren der Weg von Einweg- zu Mehrwegverpackungen erkennbar, jedoch gerade bei Onlinebestellungen in der Gastronomie wird das meiste noch in Einwegverpackungen, wie bspw. Pizzakartons, verpackt geliefert, wodurch eine höhere Abfallmenge erzeugt wird.

Eine weitere Herausforderung der Gastronomie ist die Lärmbelastung. Neben dem klassischen Gaststättenlärm durch den Betrieb der Gastronomie, kommt der Lärm durch Warenanlieferungen und der Entsorgung von Abfällen hinzu, die häufig mit größeren Fahrzeugen der Klasse N2 und N3 durchgeführt werden.

2.5 Lebensmittel

2.5.1 Abgrenzung Marktsegment

In diesem Segment wird die Belieferung von Lebensmitteln im urbanen Raum betrachtet. Abzugrenzen ist hierbei die Versorgung der Gastronomie und die Lieferung von gastronomischen Erzeugnissen an Kunden. Im Fokus steht vielmehr die Belieferung der fast 37.000 Märkte (BMEL 2023a) des Lebensmitteleinzelhandels wie Verbrauchermärkte, Discounter, Supermärkte und andere Lebensmittelgeschäfte.

Die Belieferungsstruktur der einzelnen Kategorien der Märkte des Lebensmitteleinzelhandels ist grundsätzlich ähnlich. Es gibt einerseits die Direkt-Belieferung von Erzeugnissen direkt vom

Produzenten zum Lebensmitteleinzelhandel. Dies findet vor allem statt, wenn es sich um größere Mengen oder Frische- oder Regionalprodukte handelt. Ein klassisches Beispiel wären hierbei Getränke oder frische Backwaren. Ferner verfügt der Lebensmitteleinzelhandel über Regionallager, von denen aus die Märkte in regelmäßigen Touren beliefert werden. Artikel, die selten nachgefragt werden, werden über Zentrallager zu den Märkten gebracht. Sowohl für den Fall der Zentrallager als auch auf den Fall der Regionallager werden Fahrzeuge typischerweise der Klasse N3 mit einem zGG zwischen 26 und 40 t genutzt.

Für die Logistik und die eingesetzten Fahrzeuge sind die unterschiedlichen Sortimente im Lebensmitteleinzelhandel sehr relevant. Den größten Anteil macht typischerweise das Trockensortiment aus. Hierbei handelt es sich um Waren, die ungekühlt transportiert und gelagert werden können. Im Bereich der Molkereiprodukte (MoPro) hingegen ist eine Einhaltung der Kühlkette zwingend notwendig, gleiches gilt für Tiefkühlprodukte (TK). Je nach Ausrichtung können Trockensortiment und MoPro bzw. TK jeweils mit separaten Fahrzeugen distribuiert werden. Es gibt aber auch die Möglichkeit, Fahrzeuge zu nutzen, die sowohl ungekühlte als auch gekühlte bzw. TK-Transporte kombinieren können, in diesem Fall wird häufig mit speziellen Behältern für gekühlte bzw. TK-Produkte gearbeitet. In der Regel werden Märkte in Touren mit einer typischen Anzahl Stopps zwischen vier und zehn angefahren. Große Märkte werden täglich beliefert während kleinerer Märkte z. B. nur zweimal in der Woche angefahren werden.

In der Vergangenheit gab es einen Trend zu immer größeren Märkten bzw. mehr Verkaufsfläche pro Markt. Die Anzahl an kleineren Märkten mit weniger als 300 qm Verkaufsfläche ist stark rückläufig, minus 20% zwischen 2012 und 2022 (BMEL 2023a). Dieser Trend gilt auch für die eingesetzten Fahrzeuge, hier wurden kleinere Fahrzeuge durch größere Fahrzeuge ersetzt, um die Effizienz zu steigern.

2.5.2 Fahr- und Verkehrsleistung

Um die Fahr- und Verkehrsleistung bei der Belieferung von Lebensmitteln im urbanen Raum zu berechnen, musste für den Untersuchungsraum zuerst die Anzahl an Empfängern (Märkten) bzw. die Verkaufsfläche bezogen auf die Einwohnerzahl abgeleitet werden. Die durchschnittliche Verkaufsfläche pro 1.000 Einwohner liegt bei 389 m². Diese Fläche teilt sich wie folgt auf die unterschiedlichen Marktformen auf (Anders 2015):

- ▶ 36% Discounter
- ▶ 36% Supermarkt
- ▶ 24% Verbrauchermarkt/ SB-Warenhäuser
- ▶ 4% kleines Lebensmittelgeschäft

Demnach stehen im urbanen Raum insgesamt 15,37 Mio. m² Verkaufsfläche zur Verfügung.

Eine Ableitung der Fahr- und Verkehrsleistung ist auf dieser Basis jedoch nicht darstellbar. Es existieren zwar Angaben wie sich die Mengen unterschiedlicher Lebensmittel (z. B. Fleisch, Brot, Käse) auf die Betriebsformen prozentual aufteilen (BMEL 2023b), eine Ableitung der Transportmengen (in Tonnen) hieraus ist jedoch nicht möglich. Über den pro Kopf Verbrauch unterschiedlicher Lebensmittel (z. B. Fleisch 81,7 kg/Kopf (BMEL 2022)) konnten die Transportmengen nicht abgeleitet werden, da in diesen Angaben auch Lebensmittel enthalten sind, die nicht in Lebensmittelmärkten gekauft werden (z. B. Gastronomie). Zudem werden die Märkte zu einem großen Teil mit anderen Verbraucherprodukten als Lebensmittel beliefert.

Angaben, zu welchem Anteil Lebensmittel in den Belieferungsfahrzeugen transportiert werden, sind nicht bekannt.

Somit konnte keine Ableitung der Fahr- und Verkehrsleistung für das Segment Lebensmittel erfolgen.

2.6 Handwerk

2.6.1 Abgrenzung Marktsegment

Das Handwerk gehört zum produzierenden Gewerbe und unterscheidet sich von der Industrie durch eine stärkere Betonung der Handarbeit im Gegensatz zum stärkeren Einsatz von Maschinen in der Industrie. Grundsätzlich sind die Grenzen hier fließend; Handwerksbetriebe sind in der Regel kleiner als Industriebetriebe und agieren eher lokal.

Unterschieden werden z. B. die Handwerksgruppen Bau- und Ausbaugewerbe, Elektro- und Metallgewerbe, Holzgewerbe, Bekleidungs-, Textil- und Ledergewerbe, Lebensmittelgewerbe, Gesundheits- und Körperpflege, (chemische) Reinigung und Glas-, Papier-, keramische und sonstige Gewerbe (Zentralverband des Deutschen Handwerks e. V. 2023).

Während einige Handwerksgruppen wie z. B. das Friseurhandwerk ihren Schwerpunkt der Leistungserbringung in den eigenen Betriebsräumen hat, sind andere Handwerksgruppen wie zum Beispiel das Bau- und Ausbaugewerbe überwiegend am Kundenstandort tätig, hierbei fallen dann Fahrten von und zum Kunden sowie Materialtransporte an. Der Schwerpunkt dieser Betrachtung liegt daher auf den eher extern tätigen Handwerksgruppen. Die eingesetzten Fahrzeuge reichen hierbei von Pkw über Fahrzeuge der N1-Klasse bis hin zu Lkw der N2-Klasse. Jedoch sind vereinzelt auch schwere Lkw (N3) anzutreffen.

2.6.2 Fahr- und Verkehrsleistung

Für die Betrachtung der Verkehrs- bzw. Verkehrsleistung wurden rund 100 Handwerksgewerke betrachtet. Die Gewerke sind untergliedert in Bauhauptgewerbe, Ausbaugewerbe, Handwerker für den gewerblichen Bedarf, Kraftfahrzeuggewerbe, Lebensmittelgewerbe, Gesundheitsgewerbe und Handwerker für den privaten Bedarf. Die Gewerke unterscheiden sich stark in ihrer Arbeitsweise; während einige Gewerke ihre Dienstleistung hauptsächlich in den eigenen Betriebsräumen erbringen, gibt es Gewerke, die den überwiegenden Teil beim Kunden arbeiten. Ferner gibt es Gewerke, die an einem Tag mehrere Kunden bedienen wie z. B. Elektrotechniker oder Installateure und Heizungsbauer, während andere Gewerke an einem Tag eher wenige bzw. nur einen Kunden bedienen. Hier sind zum Beispiel Gewerke aus dem Bauhauptgewerbe zu nennen.

Insgesamt wurden rund 5,4 Millionen Beschäftigte berücksichtigt (Zentralverband des Deutschen Handwerks e. V. 2023), wobei bei Teilzeitbeschäftigten eine Umrechnung auf Vollzeitäquivalent vorgenommen wurde. Auf Basis einer angenommenen Anzahl tatsächlicher Arbeitstage pro Jahr – also Arbeitstage abzüglich Urlaub, Krankheit und weitere Abwesenheit – wurde für jedes Gewerk abgeschätzt, wie viele Tage mit Wirtschaftsverkehr, d. h. arbeitsbedingter Wege, im Jahr vorkommen. Anschließend wurde eine Teamgröße je Fahrzeug zugrunde gelegt. Einige Gewerke haben eine größere Anzahl von Team-Mitgliedern pro Fahrzeug wie z. B. Gerüstbauer, während andere Gewerke typischerweise alleine ein Fahrzeug nutzen.

Über eine Anzahl von Wegen pro Tag, dies entspricht z.B., der Anzahl der Kunden pro Tag, und einer typischen Entfernung in Kilometer pro Weg im urbanen Raum wurde eine Fahrleistung pro Mitarbeiter und Jahr angenähert¹⁸.

Die Fahrleistung wird mit einer diversen Flotte erbracht. Gerade im Handwerksbereich sind viele Pkw im Einsatz. Der Hauptanteil der Wege wird allerdings in Kleintransportern bis 2,8 Tonnen zulässiger Gesamtmasse erbracht. Die Klassen über 2,8-Tonnen bzw. über 3,5-Tonnen spielen nur eine geringfügige Rolle. Dieser Effekt wird zukünftig noch weiter zunehmen, da immer weniger Verkehrsteilnehmer über entsprechende Führerscheine verfügen werden. Speziell schwere Lkw sind nur in Ausnahmefällen anzutreffen. Im Ergebnis finden mindestens 80% der Fahrleistung in den Klassen Pkw und Kleintransporter statt. In diesen Klassen besteht nach aktuellen Zulassungszahlen ein Anteil von 2,1% bzw. 2% der Fahrzeuge mit einem batterieelektrischen Antrieb. In den höheren Klassen sind aktuell praktisch keine Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb zugelassen¹⁹.

Die Verkehrsleistung als Produkt aus transportierter Masse und gefahrenen Kilometern ist im Handwerksbereich schwerer greifbar, als in anderen Segmenten, bei denen der Transport im Vordergrund steht.

Handwerker nutzen ihr Fahrzeug zum Teil als mobile Werkstatt und es werden Werkzeuge und Materialien transportiert. In den letzten Jahren hat sich aber mehr und mehr ein Trend etabliert, das größere Materiallieferungen nicht durch den Handwerker selbst erfolgen, sondern von Logistikern direkt zur Baustelle oder zum Verwendungsort geliefert werden. Insofern induzieren Handwerker mit ihren Dienstleistungen auch Transporte in anderen Segmenten.

Tabelle 20: Kennzahlen im Marktsegment Handwerk

Bezug	Kennzahl	Quelle/Anmerkung
Anteil Wege im urbanen Raum (Besuch von Kunden / Baustellen / mobile Arbeitsorte)	48%	Ableitung RegioStaR, (Destatis 2023a)
Mitarbeiter im Handwerk in Deutschland 2021	5.378.561	(Zentralverband des Deutschen Handwerks e. V. 2023)
Mitarbeiter im Bauhauptgewerbe	814.677	(Zentralverband des Deutschen Handwerks e. V. 2023)
Mitarbeiter im Ausbaugewerbe	1.544.899	(Zentralverband des Deutschen Handwerks e. V. 2023)
Mitarbeiter der Handwerke für den gewerblichen Bedarf	1.323.992	(Zentralverband des Deutschen Handwerks e. V. 2023)
Mitarbeiter im Kraftfahrzeuggewerbe	573.862	(Zentralverband des Deutschen Handwerks e. V. 2023)
Mitarbeiter im Lebensmittelgewerbe	508.014	(Zentralverband des Deutschen Handwerks e. V. 2023)
Mitarbeiter im Gesundheitsgewerbe	207.308	(Zentralverband des Deutschen Handwerks e. V. 2023)

¹⁸ Die Parameter basiert auf Annahmen des Fraunhofer IML und auf Gesprächen mit dem Zentralverband des Deutschen Handwerks

¹⁹ Die Parameter basieren auf Annahmen des Fraunhofer IML und auf Gesprächen mit dem Zentralverband des Deutschen Handwerks

Bezug	Kennzahl	Quelle/Anmerkung
Mitarbeiter der Handwerke für den privaten Bedarf	405.809	(Zentralverband des Deutschen Handwerks e. V. 2023)
Teamgrößen je Fahrzeug	i.d.R. 1 - 3	ZDH 2024 / Annahme Fraunhofer IML
Typische Wegelänge / Entfernung im urbanen Raum	5 – 30 km	ZDH 2024 / Annahme Fraunhofer IML
Anteil Fahrzeuge Klasse N1 an Gesamtverkehrsaufkommen Handwerk	79%	Eigene Berechnung Fraunhofer IML
Anteil Fahrzeuge Klasse N2 an Gesamtverkehrsaufkommen Handwerk	11%	Eigene Berechnung Fraunhofer IML
Anteil Fahrzeuge Klasse N3 an Gesamtverkehrsaufkommen Handwerk	10%	Eigene Berechnung Fraunhofer IML

Für die Fahrzeugklassen N1, N2 und N3 sind in der nachfolgenden Tabelle die Fahr- und Verkehrsleistungen im Segment Handwerk dargestellt. Wie zu erwarten, liegen bei der Fahrleistung die Fahrzeuge der Fahrzeugklasse N1 mit großem Abstand vorne. Bei der Verkehrsleistung hingegen werden große Mengen in der Klasse N3 transportiert, obwohl diese Klasse bei der Flotte der Handwerker insgesamt nur eine geringe Rolle spielt. Dies ist in der hohen Nutzlast begründet, die von einigen Gewerken im Handwerk genutzt wird. Hier ist insbesondere das Bauhauptgewerbe zu nennen. Transportiert werden neben Materialien auch Maschinen und Geräte. Die Anteile elektrischer Fahrzeuge wurden entsprechend der Zulassungszahlen des Kraftfahrt Bundesamtes angenommen und sind speziell in den Klassen N2 und N3 noch sehr gering. Kurz bis mittelfristig kann ein Anstieg der elektrischen Fahrzeuge in der Klasse N1 erwartet werden, da in diesem Segment wettbewerbsfähige, elektrisch angetriebene Fahrzeuge am Markt verfügbar sind und gleichzeitig sind die Anforderung an eine notwendige Lade-Infrastruktur geringer, als in den Klassen N2 und N3.

Tabelle 21: Fahr- und Verkehrsleistung im Marktsegment Handwerk

Fahrzeugklasse	Fahrleistung (km)	Verkehrsleistung (Tonnen x km)	Davon jeweils elektrisch angetrieben
N1	3.505.325.306	1.397.531.146	2%
N2	475.900.389	951.800.779	< 1%
N3	429.132.198	2.220.366.656	< 1%

Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer IML

2.6.3 THG-Emissionen

Im Segment Handwerk dominieren Fahrzeuge der Klasse N1 bei den Fahrzeugen. Die Klassen N2 und N3 spielen nur eine untergeordnete Rolle. Obwohl die Klassen N2 und N3 technisch bedingt

einen höheren Verbrauch pro gefahrenem Kilometer aufweisen, liegt die Klasse N1 aufgrund der vielfach höheren Fahrleistungen bei den THG-Emissionen weit vor den anderen beiden Klassen.

Batterieelektrische Fahrzeuge sind bislang nur in sehr geringem Umfang in der Flotte der Handwerkerfahrzeuge vorhanden. Demzufolge sind deren THG-Emissionen nur marginal. In Tabelle 22 sind die Well-to-Wheel THG-Emissionen des Segments je Fahrzeugklasse dargestellt.

Tabelle 22: THG-Emissionen (WTW) für das Marktsegment Handwerk (gerundet)

Kategorie	t CO _{2e} [Diesel]	t CO _{2e} [BEV]	t CO _{2e} [Summe]
N1	1.088.000	10.000	1.098.000
N2	227.000	0	227.000
N3	475.000	0	475.000
Summe	1.790.000	10.000	1.800.000

Quelle: ifeu-Berechnungen, Emissionsfaktoren TREMOD 6.43.

2.6.4 Luftschadstoffe

In Tabelle 23 sind die direkten Luftschadstoffemissionen für das Marktsegment Stückgut aufgeführt. Es werden Stickstoffoxide (NO_x) sowie Auspuffpartikel (PM) für Dieselantriebe angegeben, während der batterieelektrische Antrieb aufgrund seiner lokalen Emissionsfreiheit nicht dargestellt wird.

Tabelle 23: Luftschadstoffe (TTW) für das Marktsegment Handwerk

Kategorie	t NO _x [Diesel]	t PM _{2,5} [Diesel]
N1	2.373	55
N2	897	21
N3	1.365	12
Summe	4.635	88

Quelle: ifeu-Berechnungen, Emissionsfaktoren TREMOD 6.43.

2.6.5 Umweltwirkungen

Handwerker haben beim Kunden in der Regel eine sehr viel höhere Verweildauer, als im Segment Stückgut oder im Segment KEP. Die Fahrzeuge parken in der Regel möglichst nah am Einsatzort, um Wege zu minimieren. Je nach Kunde kann entweder ein dedizierter Parkplatz genutzt werden oder es wird im öffentlichen Straßenraum geparkt. Gerade in Innenstadtsituationen ist das Parken häufig problematisch und wird teilweise durch Parkverbote oder Anwohnerparkzonen erschwert. Die Fahrzeuge sind größtenteils aus der Klasse N1, so dass von vergleichsweise geringen Emissionen (z. B. Lärm) auszugehen ist. Auch besteht in dieser Klasse kurz- bis mittelfristig die besten Chancen einen hohen Anteil von Fahrzeugen mit alternativen

Antrieben zu erreichen, da in dieser Klasse bereits eine große Modellvielfalt am Markt angeboten wird.

2.7 Abfalllogistik

2.7.1 Abgrenzung Marktsegment

Abfälle werden in die Stoffströme Siedlungsabfälle, Abfälle aus Gewinnung und Behandlung von Bodenschätzen, Bau- und Abbruchabfälle, übrige Abfälle und Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen (Sekundärabfälle) unterschieden (Leerkamp, Bert et al. 2020), (Destatis 2021). Die jährlichen Aufkommen je Stoffstrom sind in Abbildung 32 dargestellt. Da die öffentlich-rechtliche Abfallentsorgung regional unterschiedlich organisiert ist, werden in den Haushaltsabfällen, die zu den Siedlungsabfällen gerechnet werden, in unterschiedlichem Maße hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (sogenannter Geschäftsmüll) berücksichtigt (Destatis 2023b). Da urbane Gebiete im Fokus der Betrachtung stehen, wurden für das Marktsegment Abfalllogistik ausschließlich Siedlungsabfälle sowie Bau- und Abbruchabfälle betrachtet.

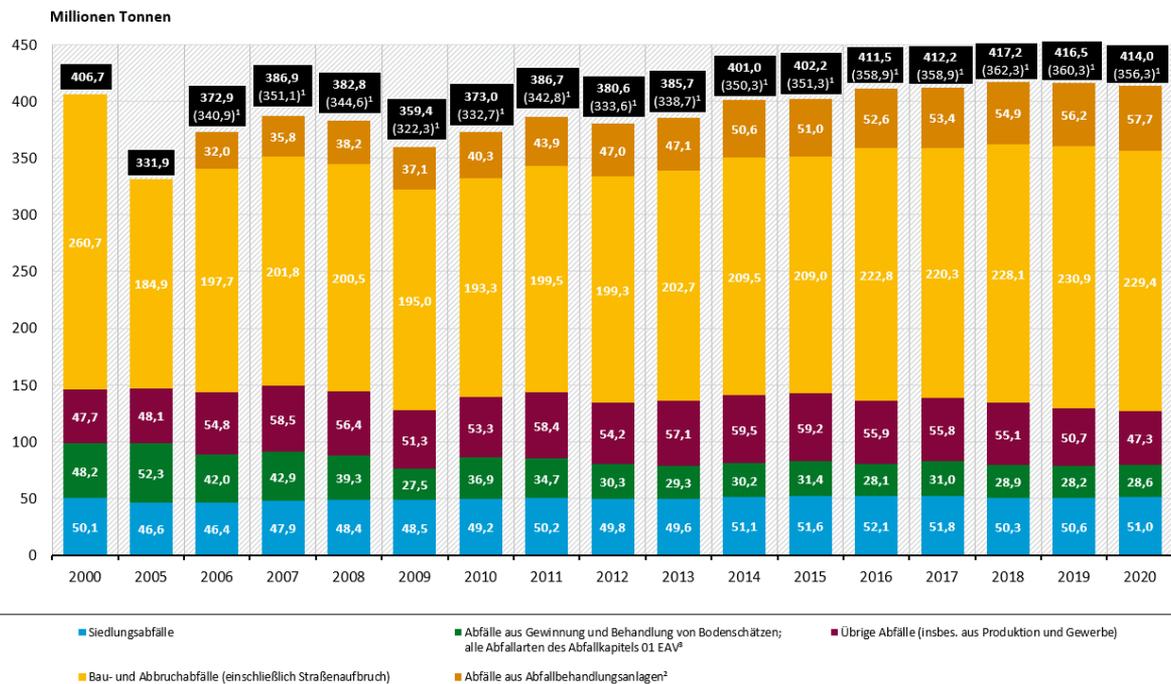
Differenziert wird in der Abfalllogistik zwischen dem Bring- und dem Holsystem. In der Berechnung wird ausschließlich das Holsystem, d.h. der Abfall wird von Entsorgungsunternehmen eingesammelt, berücksichtigt. Das betrachtete urbane Gebiet umfasst eine Anzahl an Einwohnerinnen und Einwohnern von ca. 39,5 Millionen Personen und basiert auf der RegioStaR-Einteilung (vgl. 2.1.1). Angenommen wurde für die Berechnung eine durchschnittliche Gleichverteilung der Abfälle auf alle Einwohnerinnen und Einwohnern in Deutschland.

Neben Informationen des Umweltbundesamtes (Bilitewski et al. 2018) und des statistischen Bundesamtes (Destatis 2021), (Destatis 2023b), wurden insbesondere Daten des Verbandes kommunaler Unternehmen (Verband kommunaler Unternehmen e.V. 2022) bezüglich der kommunalen Abfallentsorgung und -sammlung verwendet. Die in den Quellen verwendete Einheit Megagramm (Mg) ist ein in der Abfallentsorgung verwendetes Synonym für Tonnen, welche aufgrund der Doppeldeutigkeit in der Abfallwirtschaft verwendet wird.

2.7.2 Fahr- und Verkehrsleistung

Die Berechnungen der Fahr- und Verkehrsleistung erfolgt aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten für die Abfallarten Siedlungsabfälle und Bau- und Abbruchabfälle unterschiedlich. Grundlegend für die Berechnung der jährlichen Tonnenkilometer der Abfalllogistik im urbanen Gebiet ist für beide Berechnungen das jährliche Abfallaufkommen in Deutschland.

Abbildung 32: Abfallaufkommen in Deutschland (einschließlich gefährlicher Abfälle)



Quelle: Statistisches Bundesamt, Abfallbilanz, Wiesbaden, verschiedene Jahrgänge

¹ Nettoabfallaufkommen, ohne Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen; 2006 erstmals als Bestandteil des Abfallaufkommens erhoben.

² Ohne Abfälle aus Abwasserbehandlungsanlagen (EAV 1908), Abfälle aus der Zubereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch oder industriellem Brauchwasser (EAV 1909), Abfälle aus der Sanierung von Böden und Grundwasser (EAV 1913) und Sekundärabfälle, die als Rohstoffe/Produkte aus dem Entsorgungsprozess herausgehen.

³ Abfälle aus Gewinnung und Behandlung von Bodenschätzen.

Siedlungsabfälle

Für die Haushaltsabfallströme wurden die Daten des VKU (Verband kommunaler Unternehmen e.V. 2022) und (Destatis 2021) für Restabfall, Sperrabfall, Bioabfall, Altpapier und Leichtplastik/Verpackungsplastik gemittelt und zu einem jährlichen Abfallaufkommen pro Person umgerechnet. Multipliziert mit der Anzahl an Einwohnerinnen und Einwohnern in urbanen Gebieten wurden die jährlichen Abfallaufkommen der urbanen Stoffströme ermittelt.

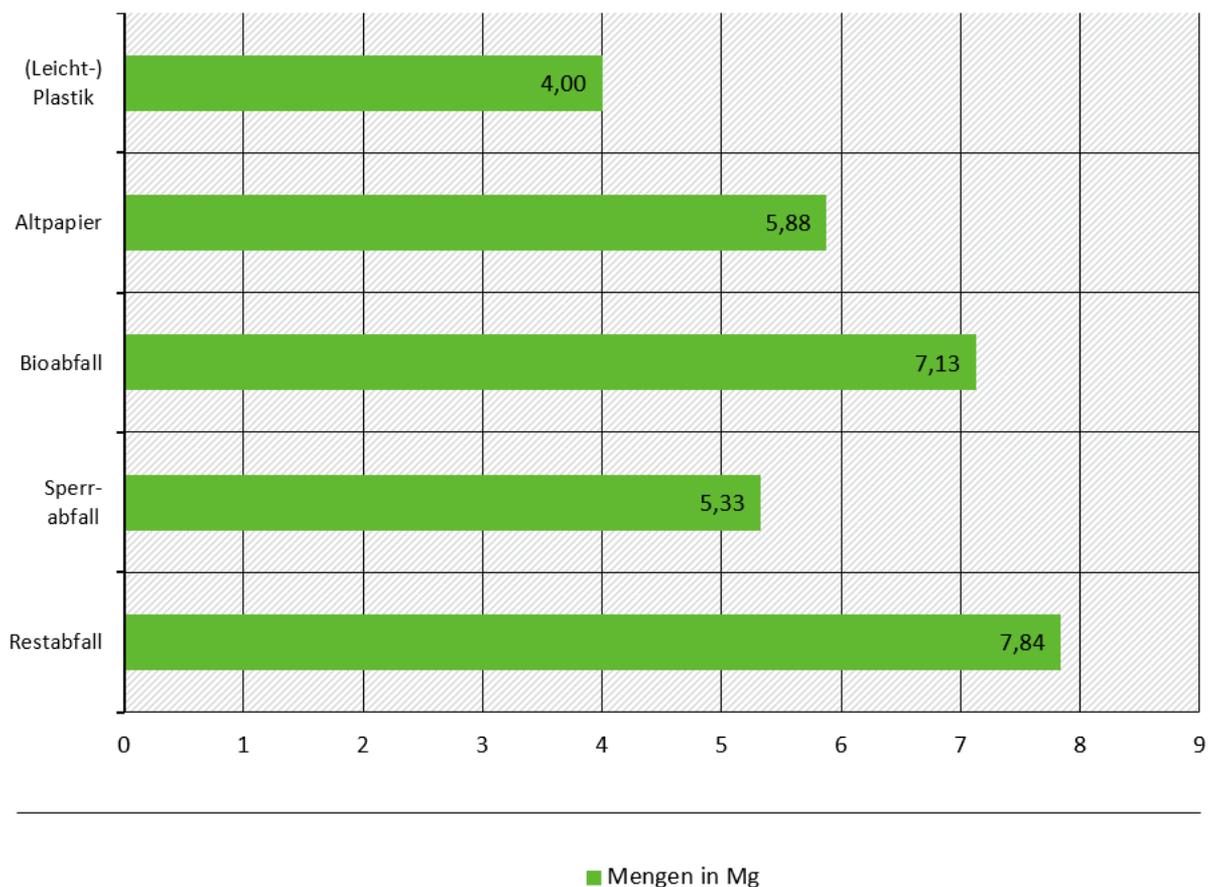
Da nicht die Gesamtheit des Abfallaufkommens durch das Holsystem der lokalen Abfallbetriebe entsorgt wird, wurden die Anteile des Abfallaufkommens im Holsystem des Verbandes der kommunalen Unternehmen als Parameter mit einberechnet (Verband kommunaler Unternehmen e.V. 2022). Die daraus resultierende Menge an jährlichem Abfallaufkommen je Abfallstrom im urbanen Gebiet wurde anschließend durch die jährlichen Abfallsammeltage dividiert. Bei der zugrundeliegenden Anzahl an Sammeltagen wurde zusätzlich zu den wöchentlichen Werktagen (Montag bis Freitag) weitere zehn Sammeltage für die Abfallentsorgung, zum Beispiel aufgrund von Feiertagen, angenommen.

Die Veröffentlichungen des VKU (Verband kommunaler Unternehmen e.V. 2022) und (Bilitewski et al. 2018) als auch Projekterfahrungen zeigen, dass primär Lkw mit 26 t zGG für die Abfallsammlung (mit Ausnahme von Sperrabfall) eingesetzt werden, welche eine gewichtsmäßige Zuladungskapazität zwischen neun und zehn Megagramm aufweisen. Unterschieden wird bei Fahrzeugen zwischen Heck-, Seiten- und Frontladern, welche je nach Sammlungsart (z.B. Haushaltstonne oder Sammelcontainer) variieren. Bei der Sammlung von

Sperrabfall kommt es aufgrund fehlender Abfallbehältnisse zu dem vermehrten Einsatz von Pritschen- und Pressabfallwägen VKU (Verband kommunaler Unternehmen e.V. 2022). Trotz verschiedener Pilotprojekte zu alternativen Antrieben in der Abfalllogistik, ist die Durchdringung der Fuhrparks gering. Neben den herkömmlichen Dieselfahrzeugen, mit einem Anteil von 97%, entfallen auf Fahrzeuge mit Erdgasantrieb 2% und 1% auf alternative Antriebe (KBA 2023).

Die gesammelten Abfallmengen je Gebietsanfahrt eines Fahrzeuges weichen von den Zuladungskapazitäten der Fahrzeuge (vgl. Abbildung 33) ab, was ein Indiz ist, dass die volumenmäßige Zuladungskapazität der limitierende Faktor bei der Zuladung ist. Beispielsweise werden täglich durchschnittlich vier Megagramm (Leicht-)Plastik, aber 7,84 Megagramm Restabfall pro Gebietsanfahrt je Fahrzeug gesammelt (vgl. Abbildung 33).

Abbildung 33: Durchschnittliche Abfallmengen pro Gebietsanfahrt



Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von VKU 2022

Mit dem Ziel die Anzahl an Sammelfahrzeugen im urbanen Gebiet kalkulatorisch zu ermitteln, wurden die gegebenen durchschnittlichen Abfallsammelmengen pro Fahrzeug der unterschiedlichen Stoffströme mit dem berechneten Abfallaufkommen des urbanen Gebietes kombiniert (Verband kommunaler Unternehmen e.V. 2022). Mit Hilfe dieser Berechnung wurde die tägliche Fahrleistung im urbanen Gebiet je Stoffstrom abgeleitet.

Durch Multiplikation der täglichen Fahrleistungen der eingesetzten Fahrzeuge (Verband kommunaler Unternehmen e.V. 2022) mit der zuvor berechneten Anzahl an eingesetzten

Fahrzeugen pro Tag, kann je Stoffstrom die tägliche Fahrleistung im gesamten urbanen Gebiet dargestellt werden. Kombiniert mit dem täglichen Aufkommen ergeben sich die Tonnenkilometer. Aufgrund des angenommenen gleichmäßig ansteigenden Sammelgewichtes eines Fahrzeuges je Tour, wurden die ermittelten Tonnenkilometer mit dem Faktor 0,5 multipliziert und nach anschließender Hochrechnung auf ein Jahr auf die unterschiedlichen Antriebsarten der Fahrzeuge verteilt.

Bau- und Abbruchabfälle

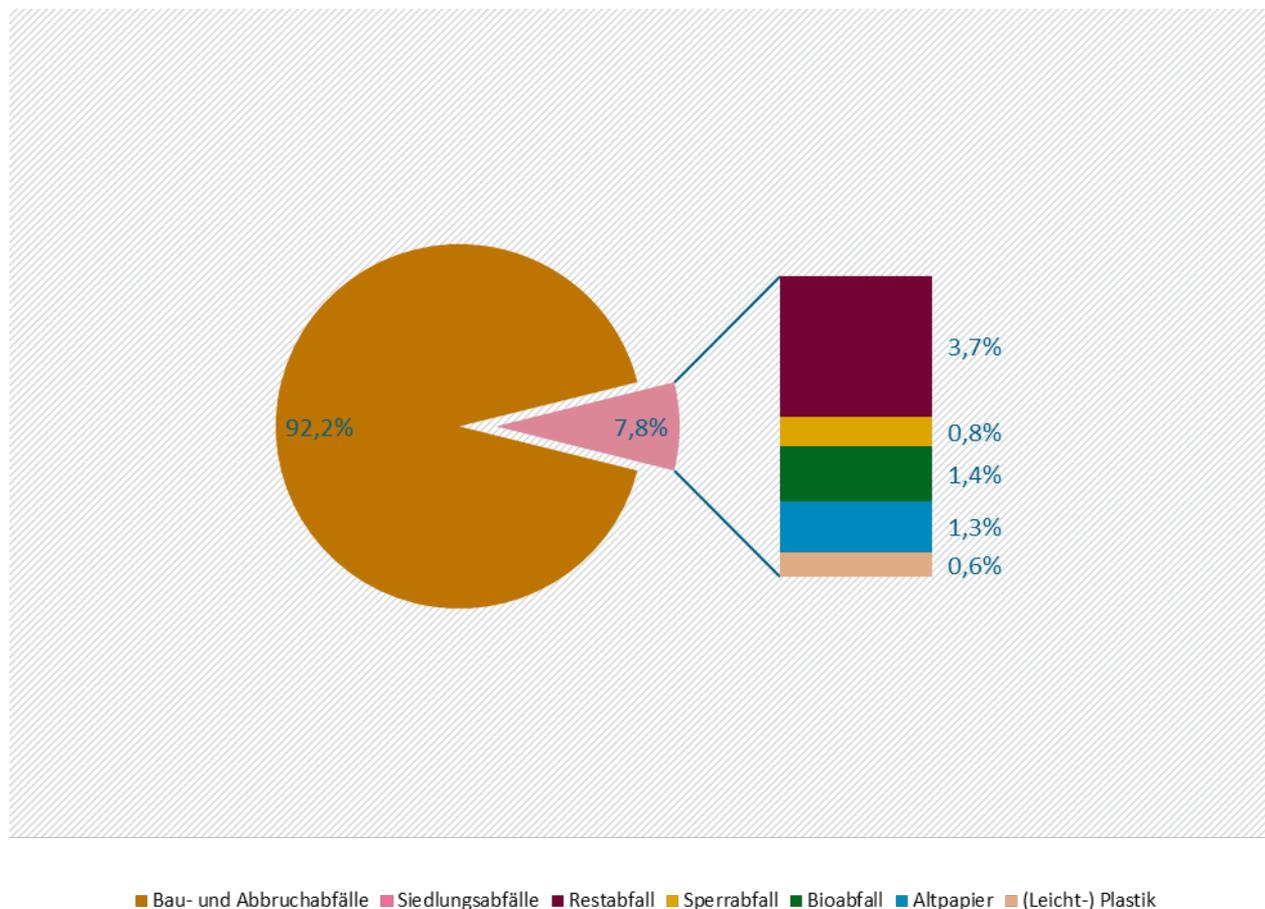
Das aggregierte jährliche Abfallaufkommen der Abfallart Bau- und Abbruchabfälle (Destatis 2023b, S. 3) wurde mit dem prozentualen Anteil der urbanen Bevölkerung an der deutschen Gesamtbevölkerung multipliziert, um die jährliche Abfallmenge in urbanen Gebieten zu ermitteln. Hierbei wurden die Annahmen getroffen, dass die Bau- und Abbruchabfälle gleichverteilt und ausschließlich im Holsystem entsorgt werden. Vergleichbar zum Vorgehen bei den Siedlungsabfällen, wurde von 250 Sammeltagen pro Jahr ausgegangen, da es sich nicht um private Abfälle handelt und nur an Werktagen entsorgt wird. Anhand der mittleren Transportweite der Gütergruppe Abfälle von 71km (Statistisches Bundesamt 2023) und der Annahme von zwei Touren je Sammelfahrzeugen pro Einsatztag, wurde die Anzahl an Sammelfahrzeugen pro Tag kalkuliert. Darüber hinaus wird die Annahme getroffen, dass 50 % der Fahrleistung innerorts erfolgen. Typischerweise werden für Schüttgüter dieser Abfallart Container mit Abrollkipper- bzw. Absetzkipper-Fahrzeugen oder Kippfahrzeuge eingesetzt. Die Zuladung der Fahrzeuge wird aufgrund der Abfallstruktur und der eingesetzten Fahrzeuge mit 12,5 Megagramm angenommen sodass 25 Megagramm pro Fahrzeug und Tag eingesammelt werden können (Meiller Fahrzeug- und Maschinenfabrik - GmbH & Co KG 2024), (PALFINGER AG 2024), (Wilhelm Schwarzmüller GmbH 2024).

Ergebnis

In Summe ergibt sich ein Jahreswert von rund 15 Mrd. tkm über alle betrachteten Stoffströme und Abfallarten. Dieser Wert bezieht sich ausschließlich auf den im Holsystem gesammelten Siedlungsabfall sowie die Bau- und Abbruchabfälle im urbanen Gebiet.

Wie in Abbildung 34 visualisiert, stellt ein Großteil der ermittelten jährlichen Tonnenkilometer dabei der Abfallstrom Bau- und Abbruchabfälle dar. Hinsichtlich der Siedlungsabfälle, unterteilt in die unterschiedlichen Stoffströme, zeigen sich anteilmäßige Unterschiede. Mit rund 285.500.000 tkm im Jahr, macht Restabfall einen Anteil von 47% der jährlichen Tonnenkilometer aus. Bioabfall und Altpapier mit 18% und 17% sowie Sperrabfall mit 10% und (Leicht-) Plastik mit einem Anteil von 8% haben einen deutlich kleineren Anteil innerhalb der Siedlungsabfälle des jährlichen Logistikaufkommens der Abfallwirtschaft im urbanen Gebiet. Die jährliche Fahrleistung im Bereich Abfalllogistik im urbanen Gebiet beträgt insgesamt ca. 0,7 Mrd. km.

Abbildung 34: Anteil jährlicher Tonnenkilometer im urbanen Gebiet im Marktsegment Abfalllogistik (Holsystem)



Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von VKU 2022, Destatis 2021, UBA 2018, Eisenmann u. a. 2022

2.7.3 THG-Emissionen

Aufgrund des abfallspezifischen Tourenprofils bei der Sammlung, das durch eine sehr hohe Anzahl Start- und Stopp-Vorgänge und eine geringe Distanz zwischen den Stopps gekennzeichnet ist, beträgt der Fahrzeugverbrauch für die 26 t zGG Sammelfahrzeuge durchschnittlich ca. 60 Liter auf 100km²⁰. Die Well-to-Wheel THG-Emissionen des in Kapitel 2.7 beschriebenen Segments Abfalllogistik betragen insgesamt rund 1,05 Millionen Tonnen CO_{2e}. Die Fuhrparks des Segments Abfalllogistik weisen nur einen geringen Anteil Fahrzeuge mit alternativen Antriebsarten aus, so dass Fahrzeuge mit Diesel-Antrieb überwiegend eingesetzt werden.

Bau- und Abbruchabfälle haben einen Anteil an den jährlichen Tonnenkilometern im urbanen Gebiet im Marktsegment Abfalllogistik im Holsystem von rund 92 % und emittieren rund 80 % der CO_{2e} Emissionen in urbanen Gebieten. Diese Differenz ergibt sich aus den hohen durchschnittlichen Verbräuchen bei der Sammlung von Siedlungsabfällen. In Tabelle 24 sind die Well-to-Wheel THG-Emissionen des Segments je Fahrzeugklasse dargestellt.

²⁰ Verbrauch ist stark abhängig von Parametern, wie z.B. Topografie, Verhältnis An- und Abfahrt ins Sammelgebiet, Stoppdichte etc.

Tabelle 24: THG-Emissionen (WTW) für das Marktsegment Abfalllogistik (gerundet)

Kategorie	t CO _{2e} [Diesel]	t CO _{2e} [Erdgas]	t CO _{2e} [BEV]	t CO _{2e} [Summe]
26 t	210.400	2.000	500	212.900
40 t	838.100	-	-	838.100
Summe	1.048.500	2.000	500	1.051.000

Quelle: ifeu-Berechnungen, Emissionsfaktoren TREMOD 6.43.

2.7.4 Luftschadstoffe

Tabelle 25 zeigt die direkten Luftschadstoffemissionen für das Marktsegment Abfalllogistik auf. Neben den Stickstoffoxiden (NO_x) werden noch die Auspuffpartikel (PM) für die Antriebsarten Diesel und Erdgas ausgewiesen. Hierbei ist eine gewisse Ungenauigkeit zu berücksichtigen, da sowohl das individuelle Fahrverhalten als auch die genaue Flottenzusammensetzung (z. B. Euro 5, Euro 6) des Marktsegments Abfalllogistik nicht bekannt ist. Der batterieelektrische Antrieb entfällt, da er lokal emissionsfrei ist.

Tabelle 25: Luftschadstoffe (TTW) für das Marktsegment Abfalllogistik

Kategorie	t NO _x [Diesel]	t NO _x [Erdgas]	t PM _{2,5} [Diesel]	t PM _{2,5} [Erdgas]
26 t	351	1	3	0,02
40 t	1.177	-	13	-
Summe	1.528	1	16	0,02
	1.529		16	

Quelle: ifeu-Berechnungen, Emissionsfaktoren TREMOD 6.43.

2.7.5 Umweltwirkungen

Weitere Auswirkungen hat die Abfalllogistik u.a. auf die Verkehrssicherheit, den Verkehrsfluss und Geräuschemissionen. In Deutschland kamen im Jahr 2017 insgesamt 3.180 Menschen bei Verkehrsunfällen ums Leben. Bei ca. 60% der tödlichen Unfälle waren Lkw über 12t zGG, bei den Fahrmanövern Spurwechsel und Auffahrunfälle, beteiligt. Auf Abbiegeunfälle entfallen 15% der tödlichen Verkehrsunfälle im Jahr 2017 (Gruchmann et al. 2022). Für die Abfalllogistik ist die Abfallsammlung auf Platz eins bei der Anzahl Arbeitsunfällen. Auf den Tätigkeitsbereich der Abfallsammlung (inkl. Sperrmüll) entfielen 2017 insgesamt 49% aller meldepflichtigen Arbeitsunfälle (Verband kommunaler Unternehmen e.V. 2019).

In den Städten Frankfurt am Main und Wiesbaden wurden Daten über den innerstädtischen Wirtschaftsverkehr erhoben. Fahrzeuge der Abfalllogistik hatten dabei den höchsten Anteil an größeren Fahrzeugen und wiesen gleichzeitig die kürzesten Aufenthaltsdauern auf. Bei der Erhebung hatten 45% der Fahrzeuge eine maximale Aufenthaltsdauer von maximal drei Minuten (Schäfer et al. 2020).

Maßnahmen zur Verringerung des Einflusses der Abfalllogistik auf den fließenden Verkehr sowie zur Verringerung von THG-Emissionen, werden zeitliche Verlagerungen in verkehrsschwächere Tageszeiten und eine optimierte Routenplanung diskutiert. Aufgrund des geringen Anteils der Sammelfahrzeuge am Gesamtverkehr, haben die Auswirkungen dieser Maßnahmen jedoch keinen wahrnehmbaren Effekt auf den Klimaschutz (Schmaus et al. 2023). Geräuschemissionen können sowohl für Anwohnerinnen und Anwohner als auch für Beschäftigte in der Abfallsammlung gesundheitsgefährdend sein. Der Schüttvorgang ist geräuschintensiv, so dass Abfallwirtschaftsbetriebe technische, organisatorische und persönliche Maßnahmen zur Verringerung der Geräuschemissionen ergreifen (Unfallkasse Hessen 2024).

2.7.6 Methodische Hinweise

In diesem Bericht wurde die durchgeführte Berechnung der Tonnenkilometer des Abfallaufkommens urbaner Gebiete in Deutschland aufgeführt. Aufgrund der Fokussierung auf die urbane Logistik wurden die Abfallarten Abfälle aus Gewinnung und Behandlung von Bodenschätzen, übrige Abfälle und Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen (Sekundärabfälle) in der Berechnung nicht berücksichtigt. Für die Ströme der Siedlungsabfälle sowie der Bau- und Abbruchabfälle wurden verschiedene Datenquellen kombiniert und die aggregierten Daten auf die Abfalllogistik für die Einwohnerinnen und Einwohner der urbanen Gebiete Deutschlands bezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich das jährliche Abfalllogistikaufkommen auf knapp 15 Mrd. tkm beläuft. Über 92% davon gehen auf den Bau- und Abbruchabfall zurück, wobei angenommen wird das 50% der Fahr- und Verkehrsleistung in urbanen Gebieten erfolgt und dementsprechend in der Berechnung der Fahrleistung, Verkehrsleistung sowie der THG-Emissionen berücksichtigt wird. Bei den Siedlungsabfällen beträgt der Anteil des Restabfalls der jährlichen Tonnenkilometer 44,3%. Die Detaillierung der Berechnung von Siedlungsabfällen im Holsystem begründet sich durch die öffentliche Verfügbarkeit an Informationen hinsichtlich der Fahrtwege, Entfernungen und Auslastungen der eingesetzten Fahrzeuge für die Sammelfahrzeuge. Eine Konkretisierung dieser Informationen für die Bau- und Abbruchabfälle sowie zusätzliche Informationen bezüglich gewerblicher Abfälle, Bringsystemen und privater Abfallunternehmen ist in weitergehenden Berechnungen sinnvoll. Die Methodik, das Vorgehen und die verwendeten Werte wurden im Rahmen von zwei Fachgesprächen validiert. Gespräche wurden mit einem Experten aus dem Bereich Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft sowie einer Person aus der zentralen Logistiksteuerung eines deutschlandweit tätigen Unternehmens der Abfallwirtschaft geführt.

3 Flächenbelegung und Trennwirkung durch Verkehr

Während die Bilanzierung von emissionsbezogenen Umweltwirkungen wie Klimawandel und gesundheits- oder ökosystemschränkende Luftschadstoffemissionen heute mit standardisierten Methoden erfolgt, liegen solche Methodenstandards für die Flächenwirksamkeit von Verkehrssystemen bzw. Verkehrsdienstleistungen bislang nicht vor. Bei der Verbrennung von einem Liter Dieselkraftstoff können beispielsweise die Emissionen mit wissenschaftlicher Genauigkeit durch Berechnung bzw. auch Messung zugewiesen werden. Ein solcher Vorgang ist bei der Zuweisung von Fläche zu einer Verkehrsdienstleistung keineswegs trivial. Zwar gibt es Daten zur Flächenbelegung durch Verkehrswege zu einem gegebenen Zeitpunkt und auch die Verkehrsleistung lässt sich für den Zeitpunkt bzw. Zeitraum bestimmen. Das Verkehrsaufkommen ist jedoch innerhalb des Streckennetzes sehr unterschiedlich und die Verkehrsfläche wird gemeinsam von verschiedensten Verkehrsmitteln im Güter- und Personenverkehr genutzt. Damit muss eine Umlegung auf die verschiedenen Verkehrsmittel erfolgen

Mit der Zurechnung der reinen Flächenbelegung zu einer Verkehrsdienstleistung ist im Übrigen die damit verbundene Umweltwirksamkeit noch nicht abgebildet. Die Folge von Versiegelungen aber auch Trennwirkungen und Zerschneidung der Landschaft gilt es dabei zu berücksichtigen.

3.1 Methode zur Flächeninanspruchnahme und dazugehörige Umweltwirkungen je Verkehrsart bzw. Verkehrsträger

Verkehrsinfrastruktur kann von unterschiedlichen Verkehrsarten in Anspruch genommen werden. Beispielsweise werden Straßen nicht nur vom Personenverkehr in Anspruch genommen, sondern auch durch den Gütertransport. Daher kann die zugrundeliegende Flächeninanspruchnahme und durch sie entstehende Umweltwirkungen nicht nur einem Verkehrsmittel zugerechnet werden. Eine Allokation der belegten Fläche und der Umweltwirkungen ist notwendig.

Die Allokation erfolgt über die Methode B von (Allekotte et al. 2020). Hier werden das Produkt aus Fahrzeuglänge und Spurbreite multipliziert mit der Fahrleistung des Fahrzeuges (siehe Anhang A.4). Für die Bewertung der Umweltwirkungen durch Versiegelung kann das Hemerobie-Konzept nach Fehrenbach et al. (2021a; b) herangezogen werden. Das Hemerobie-Konzept beschreibt das Maß der Kultivierung eines Ökosystems bzw. einer Landschaft und kann verwendet werden, um eine Einstufung dieser vorzunehmen. Hier werden sieben Klassen unterschieden: (I) natürlich bis (VII) nicht-natürlich/ künstlich und die jeweiligen Zwischenabstufungen (II-VI) (siehe Tabelle 26), die jeweils einem Charakterisierungsfaktor zugeordnet werden können (Fehrenbach et al. 2021b). Die Angabe erfolgt in Form des Naturfernepotentials in Quadratmeter bzw. Quadratkilometern artifizierender Flächenäquivalente (aF-Äq.).

Tabelle 26: Beschreibung der Hemerobie-Klassen nach Giegrich und Sturm (1999).

Hemerobie-Klasse	Bezeichnung der Klasse
I	Natürlich
II	Naturnah
III	Bedingt naturnah
IV	Halbnatürlich
V	Bedingt naturfern
VI	Naturfern
VII	Nicht-natürlich/ künstlich

Die Einteilung der untersuchten Fläche erfolgt über Bewertungskriterien, die für eine Bandbreite an Nutzungsarten erarbeitet wurden. Die Fläche von (linearer) Verkehrsinfrastruktur stellt durch ihren Aufbau in der Regel eine versiegelte Fläche dar. Hier wird derzeit nicht zwischen asphaltierter Fahrbahn oder nicht vollversiegelten Bahntrassen unterschieden, da bei letzterer der Aufwuchs dauerhaft verhindert wird und vielfach Drainagen installiert sind. So wird der menschliche Eingriff dauerhaft aufrechterhalten. Versiegelte Flächen werden generell der Klasse VII zugeteilt (Fehrenbach et al. 2021b). Weitere Flächen, die der (linearen) Verkehrsinfrastruktur ursächlich zugerechnet werden können, wie beispielsweise begrünte Mittelstreifen oder Böschungflächen, werden der Klasse V zugeordnet. Dies ergibt sich aus den Bewertungskriterien für Brachflächen (Fehrenbach et al. 2021b).

3.2 Konzepte zur Bewertung der Trennwirkung und Zerschneidung

3.2.1 Definition von Barriere- und Trennwirkung

Als (anthropogen verursachte) Barriere kann ein lineares oder punktuell Hindernis verstanden werden, das den funktionalen ökologischen Zusammenhang zwischen zwei benachbarten Flächen entscheidend beeinflusst (BfN und BMUV 2023). Die Barriere, die ein Verkehrsweg darstellt, zieht verschiedene Wirkungen nach sich: Habitatverlust, Verkehrsmortalität, Trennwirkung und Zerteilung (Jaeger und Holderegger 2005).

Der Zugang zu unterschiedlich genutzten Teillebensräumen, wie etwa Sommer- und Winterhabitate, sowie Ressourcen, wie Nahrung und Nist-/Brutplätze im tageszeitlichen oder jahreszeitlichen Verlauf, ist grundlegend für das Überleben einer Population und kann durch eine Barriere verhindert werden (Jaeger und Holderegger 2005; Schwarz-von Raumer 2021). Verkehrswege führen folglich häufig zu einer räumlichen Trennung von Lebensraum-Elementen, die nur als Ganzes einen funktionierenden Lebensraum ergeben (Giulio et al. 2010) und damit zu Mobilitätseinschränkungen von Arten (Schwarz-von Raumer 2021). Unterschiedliche Arten sind von den Wirkungen unterschiedlich stark betroffen (Van Der Ree et al. 2011). Ein eingeschränkter Zugang zu Ressourcen kann niedrige Reproduktions- und Überlebensraten nach sich ziehen, was wiederum den Fortbestand der Population beeinträchtigen kann (Jaeger et al. 2005). Die Trennwirkung generiert sich u. a. aus dem Meideverhalten von Tieren in Bezug auf die Verkehrsinfrastruktur und den Verkehr (Giulio et al. 2010; Jaeger et al. 2005; Schwarz-von Raumer 2021), welche wiederum je Art sehr unterschiedlich ausfallen kann.

Die Zerschneidung kann als Zerteilen der Landschaft in Fragmente, d. h. als eine Unterbrechung zusammenhängender oder funktional in Verbindung stehender landschaftlicher Strukturen

durch Elemente der technischen Infrastruktur verstanden werden. Dies beinhaltet unter anderem Straßen- oder Bahntrassen, Seeschiffahrts- oder Bundeswasserstraßen oder Bebauung (BfN und BMUV 2023; Schwarz-von Raumer 2021). Barrieren können Populationen in isolierte Teilpopulationen zerteilen, in denen mit zunehmender Anzahl und Stärke der Barrieren der Genfluss verringert wird (Jaeger und Holderegger 2005).

Technische Infrastrukturen, wie etwa Verkehrswege, beanspruchen nicht nur die Fläche auf der sie gebaut sind, sondern bilden Barrieren, die zuvor funktional zusammenhängende Lebensräume trennen (Balzer et al. 2017). Die Wirkung der Barriere erstreckt sich über die eigentliche Infrastrukturfläche hinaus (Peaden et al. 2015). Diese Wirkung der Barriere kann durch unterschiedliche Konzepte begriffen und quantifiziert werden. Dabei wird in der Regel die Wirkung über die eigentlich durch Infrastruktur belegte Fläche hinaus mit einbezogen.

Verkehrsinfrastruktur kann entlang ihrer Ränder auch zur Entstehung neuer Habitats für Pflanzen und Tiere bspw. in Form von Grasland, Hecken und Feldgehölzen oder Ruderalstandorten²¹ beitragen (Giulio et al. 2010). Dies ist jedoch lokal stark unterschiedlich und abhängig von den örtlichen Gegebenheiten und der jeweiligen Nutzung und Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur. Darüber hinaus können lineare Verkehrsinfrastrukturen für manche heimische und nicht-heimische Arten Ausbreitungs- und Wanderkorridore darstellen (Giulio et al. 2010). Ob es sich hierbei um einen zu fördernden oder zu vermeidenden Effekt handelt, beinhaltet eine Diskussion zu Werthaltungen, die an dieser Stelle nicht vorgenommen werden kann.

3.2.2 Methoden zur Wirkungsabschätzung von Verkehrsinfrastruktur

Um die Wirkung von Verkehrsinfrastruktur zu quantifizieren bestehen bereits verschiedene Ansätze mit jeweils unterschiedlichen Fokussen. An dieser Stelle erfolgt zunächst eine kurze Beschreibung einiger der bestehenden Ansätze.

Straßeneffektzone und Infrastruktureffektzone

Die Straßeneffektzone, englisch „road effect zone“, beschreibt die durch die Barriere beeinflusste Fläche, auf der die Dichte von Populationen durch die Wirkungen der Barriere verringert wird. Verschiedene Straßenkategorien wirken in unterschiedlicher Intensität und auf unterschiedlicher Entfernung (Andrasi et al. 2021). Dabei wirken Barrieren in Form von Verkehrsinfrastruktur direkt, bspw. durch Verkehrsmortalität, oder indirekt durch Störung der physischen bzw. chemischen Umwelt und verändertes Verhalten seitens der Arten (Semlitsch et al. 2007). Straßeneffektzonen quantifizieren folglich das tatsächliche Ausmaß des Lebensraumverlustes für Arten (Peaden et al. 2015). Art und Intensität der Lebensraumverschlechterung hängen vom Straßenvermeidungsverhalten und der Empfindlichkeit der Wildtierarten gegenüber den Auswirkungen der Verkehrsinfrastruktur, der Straßengröße und dem Verkehrsaufkommen ab (Jaeger et al. 2005; Madadi et al. 2017). Quantifiziert wird die Wirkung in der Regel lokal und für jeweils ausgewählte Arten durch Untersuchung ausgewählter Straßenabschnitte. Die Lärmeffektzone basiert auf dem gleichen Prinzip wie die Straßeneffektzone, indem sie die tatsächlich durch Lärm beeinträchtigten Habitatflächen quantifiziert (Madadi et al. 2017). Die Infrastruktureffektzone bezieht lineare Infrastruktur wie Bahn oder Stromtrassen mit ein (De Jonge et al. 2022).

²¹ Als Ruderalstandorte werden Standorte bezeichnet, die von Pflanzen besiedelt werden, die sich auf vom Menschen gestörte oder störungsreiche Umgebungen spezialisiert haben.

Unzerschnittene verkehrsarme Räume und Unzerschnittene Funktionsräume

Ausgangspunkt der unzerschnittenen verkehrsarmen Räume (UZVR) war die Erholungsvorsorge für die vom steigenden Verkehrslärm belastete Bevölkerung in 1979. Das Konzept der UZVR sollte großflächige vom Verkehrslärm unbelastete Räume erhalten. Seitdem wurde das Konzept der UZVR weiterentwickelt. Die Kriterien zur Berechnung der Zerschneidung beziehen folgende Punkte mit ein (Gawlak 2019):

- a) Bundesautobahnen, Bunde-, Landes- und Kreisstraßen mit einem Verkehrsaufkommen >1000 Kfz/Tag²²
- b) Bahnen: mehrgleisig oder eingleisig und elektrifiziert. Tunnel >1000 m nicht zerschneidend
- c) Kanäle der Schifffahrtsklasse 4
- d) Siedlungen >93 ha
- e) Flughäfen

Die UZVR bilden den Kriterien entsprechende Räume ab und werden ab einer (Brutto-)Mindestgröße von >100 km² als solche bezeichnet. Die Belange der Biodiversität werden mit dem Indikator der UZVR nicht abgebildet (Reck et al. 2008). Unzerschnittene verkehrsarme Räume sind nicht mit naturnahen Räumen gleichzusetzen. Sie können trotz geringen Verkehrsaufkommens und weniger engen Verkehrsnetzen durch nicht naturnahe Flächennutzung gekennzeichnet sein (UBA 2021a). Der Indikatorwert wird insbesondere von der Verkehrsbelastung im nachgeordneten Verkehrsnetz, abseits der Hauptverkehrsachsen, beeinflusst (UBA 2021a).

Die unzerschnittenen Funktionsräume (UFR) sollen die Zerschneidung von Biotopverbunden, im Hinblick auf ihre Lage und ihren Zusammenhang als ökologische Funktionsräume bezeichnet, quantifizieren. UFR sind damit ein Maß für die Zerschneidung schützenswerter Lebensräume (Reck et al. 2008). Sie sind Teil von Lebensraumnetzen, die durch Verkehrsinfrastruktur mit erheblicher Barrierewirkung begrenzt, aber nicht selbst durchschnitten sind und je nach Anspruch der Arten definiert werden. Dabei wird die Stärke der Barriere in Form der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke mit unterschiedlichen Schwellenwerten je Art definiert (Reck und Hänel 2010).

Effektive Maschenweite

Eine weitere Möglichkeit, um das Ausmaß der Zerschneidung zu quantifizieren stellt die effektive Maschenweite dar (Becker 2016). Die effektive Maschenweite (m_{eff}), wie sie Jaeger (Jaeger 2002) vorschlägt, basiert auf den vereinfachten Annahmen, dass alle Verkehrsinfrastruktur und Siedlungsflächen die ökologische Beziehung zwischen den von ihnen zerschnittenen Lebensräumen negativ beeinflussen und dass innerhalb der verbliebenen Flächen die ökologische Verbindungen ungestört bleiben (Jaeger und Holderegger 2005). Die effektive Maschenweite basiert auf der Wahrscheinlichkeit, mit der zwei zufällig ausgewählte Punkte in einem Gebiet nicht durch Barrieren voneinander getrennt sind. Die Multiplikation mit der untersuchten Gebietsfläche ergibt die effektive Maschenweite. Je kleiner der Wert der effektiven Maschenweite, desto höher die Zerschneidung. Entspricht der Wert der effektiven Maschengröße der Größe der untersuchten Fläche, so handelt es sich um ein völlig unzerschnittenes Gebiet. Es wird keine Unterscheidung zwischen den einzelnen Barrieren und

²² Die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) = 1000 entspricht den aufgelisteten Straßen.

ihrer Wirkungen gemacht. Die effektive Maschenweite repräsentiert das Ausmaß der Durchdringung eines Raumes mit Siedlungs- und Verkehrsinfrastruktur (Reck et al. 2008).

BfN-Zerschneidungskriterien der Wildnisgebiete

Wildnisgebiete sind i. d. R. nutzungsfrei, aber dennoch eingebunden in die sie umgebende Kulturlandschaft. Das Bundesamt für Naturschutz (BfN) und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) haben für die Wildnisgebiete in Deutschland Kriterien zur Bemessung von Zerschneidung und Barrierewirkung definiert. Diese Kriterien dienen als Schwellenwerte für die Bemessung von Zerschneidung und Barrierewirkung von Infrastrukturelementen. Unterschieden wird in vier Barriere-Kategorien (A, B, A/B und C) (BfN und BMUV 2023).

Zu Kategorie A gehören alle Elemente, die durch ihre Barrierewirkung das (Wildnis-)gebiet immer in zwei oder mehrere Teilflächen trennen. Dazu gehören (BfN und BMUV 2023):

- a) Bundesautobahnen
- b) Bundesstraßen
- c) Straßen und Wege mit nächtlicher Beleuchtung
- d) Aktive zwei- oder mehrgleisige Bahnstrecken
- e) Kanäle, die als Bundeswasserstraßen genutzt werden
- f) Bundeswasserstraßen aus dem Kern- oder Nebennetz mit unüberwindlichen Uferbefestigungen
- g) Seeschifffahrtsstraßen

Für diese Kategorie wurden sogenannte Pufferbereiche definiert (siehe Tabelle 27), die die Fläche auf denen diese Verkehrsinfrastruktur eine Störwirkung ausübt darstellt. Dieser Pufferbereich ist beidseitig der linearen Struktur anzuwenden (BfN und BMUV 2023).

Tabelle 27: Übersicht Elemente der Kategorie A mit Pufferabstand (BfN und BMUV 2023).

Elemente der Kategorie A	Pufferabstand (einseitig)
Bundesautobahn (BAB)	140 m
Sonstige Straßen mit Barrierewirkung	70 m
Bahnstrecken mit Barrierewirkung	70 m
Seeschifffahrtsstraßen	70 m
Kanäle und Wasserstraßen mit Barrierewirkung	35 m
Deiche mit Barrierewirkung aufgrund ihrer Bewirtschaftung	35 m

Die Kategorie B umfasst Elemente, die nur in Summe eine Störwirkung hervorrufen. Kategorie A/B listet Elemente, die in Abhängigkeit ihrer Nutzungsintensität eine Barrierewirkung entfalten. Elemente der Kategorie C stellen solche dar, die keine Barrierewirkung hervorrufen. Siedlungsflächen oder ähnliche Flächen sind in diesem Konzept nicht berücksichtigt. (BfN und BMUV 2023).

3.2.3 Vorschlag zur Einbeziehung von Trennwirkung

Flächenbezogene Umweltauswirkungen (linearer) Verkehrsinfrastruktur können über das Hemerobie-Konzept nach Fehrenbach et al. (2021b) bewertet werden. Wie bereits beschrieben kann hier eine Unterscheidung zwischen den unterschiedlichen Flächen, die alle ursächlich der Verkehrsinfrastruktur zugerechnet werden können, vorgenommen werden, sodass eine qualitativ differenzierte Bewertung möglich ist.

Die oben aufgeführten Bewertungen zur Wirkungsabschätzung der Verkehrsinfrastruktur legen unterschiedliche Fokusse und weisen verschiedene Methoden als Grundlage auf. Sowohl die effektive Maschenweite als auch die UZVR und UZF beziehen sich auf der Raumebene auf die Zerschneidung. In diesem Raum kann lineare Verkehrsinfrastruktur unterschiedlicher Art auftreten. Für die Zuordnung der Trennwirkung einzelner linearer Infrastrukturelemente ist jedoch die Art des Infrastrukturelements entscheidend. Sowohl die Methoden von Straßen- und Infrastruktureffektzone als auch die Zerschneidungskriterien für Wildnisgebiete der Kategorie A gehen auf die jeweilige Art des Infrastrukturelementes ein. Für Straßen- und Infrastruktureffektzone sind jedoch art- und ortsspezifische Untersuchungen notwendig, sodass diese Daten jeweils nur auf diese limitiert Aussagen zulassen. Bundes- oder regionsweite Daten liegen unseres Wissens nach weder für alle Arten noch für so genannte Stellvertreterarten vor.

Die BfN-Zerschneidungskriterien für Wildnisgebiete der Kategorie A geben eine Zonierung neben dem Infrastrukturelement auf Basis dessen Größe bzw. Funktion vor, unabhängig von Arten, die von der Zerschneidung und Trennwirkung betroffen sind. Dem jeweiligen Infrastrukturelement wird somit eine zusätzliche Fläche angerechnet, auf der eine negative Wirkung ausgehend vom Infrastrukturelement angenommen wird. Diese Kriterien bieten durch ihren Aufbau einen Anknüpfungspunkt an das Hemerobie-Konzept nach Fehrenbach et al. (2021b). Die zusätzliche Ausweisung der Pufferzonen zu jedem einzelnen Verkehrsinfrastrukturelement kann hier theoretisch, wie die Ausweisung von begleitenden Flächen, wie beispielsweise begrünter Mittelstreifen oder Böschungsflächen, vorgenommen werden. Mit jeder Flächeneinheit einer Verkehrsinfrastruktur würde so die Menge der versiegelten Fläche der Hemerobie-Klasse VII und die Menge der jeweiligen Pufferzone sowie der begleitenden Flächen ausgewiesen werden. Hier stellt sich jedoch die Problematik, dass die Fläche der Pufferzone, trotz der Trennwirkung durch Verkehrsinfrastruktur, durch andere Flächennutzungen, beispielsweise Landwirtschaft, in Anspruch genommen werden kann. Dies ergibt sich durch die Anwendung der Pufferzonen auf Verkehrsinfrastruktur außerhalb der Wildnisgebiete. So angewendet, würde eine Doppelzählung dieser Flächen erfolgen.

Eine Möglichkeit diese Problematik zu lösen liegt darin, die Hemerobie-Klasse VII weiter auszudifferenzieren und damit mindestens eine weitere Hemerobie-Klasse zu schaffen. Dies wurde bereits von Fehrenbach et al. (2021b) für den Umgang mit besonders schwerwiegenden Auswirkungen auf die Umwelt vorgeschlagen.

Das Hemerobie-Konzept sieht derzeit als schlechtmöglichsten Fall die Klasse VII vor, die versiegelte und überbaute Flächen, Abbauf Flächen, Halden und Deponien umfasst. Eine Erweiterung der Hemerobie-Klassen ist technisch einfach lösbar, da das angewendete Prinzip der Verdoppelung bzw. Halbierung zwischen den Faktoren der jeweiligen Klassen einfach fortgeschrieben werden kann. Die Hemerobie-Klasse VII wird der Faktor 1 zugeordnet. Folglich würde bspw. der Klasse VII* ein Faktor 2 zugeordnet werden (Fehrenbach et al. 2021b). Hierbei handelt es sich aber erst einmal um einen explorativen Ansatz. Die empirische Belegung der exponentiellen Zunahme der Faktoren oberhalb der Klasse VII steht noch aus. Das zugrundeliegende Modell basiert nicht auf mess- und skalierbaren naturwissenschaftlichen Größen, anders als bspw. das Treibhauspotential (Global Warming Potential), und erfolgt

zunächst auf subjektiver Einschätzung. Mit der Operationalisierung des Vorschlages gehen dementsprechend Unsicherheiten einher. Eine andere (Ökobilanz-)Methode, die die Trennwirkung durch Verkehrsinfrastruktur abbildet, ist jedoch nicht bekannt.

Entsprechend der oben beschriebenen Herangehensweise werden versiegelte Flächen, die darüber hinaus keine weiteren (Trenn-)Wirkungen aufweisen, nach wie vor der Hemerobie-Klasse VII zugeordnet. Die Trennwirkung von Verkehrsinfrastruktur wird mittels der Zerschneidungskriterien für Wildnisgebiete berücksichtigt. Je größer der Pufferabstand der jeweiligen Verkehrsinfrastruktur ist (siehe Tabelle 27), desto höher ist die zugehörige Hemerobie-Klasse (VII, VII* oder VII**). Somit wird sowohl der Versiegelung als auch der Trennwirkung und Zerschneidung Rechnung getragen. Wie Tabelle 27 zeigt, betragen die Pufferabstände nach BfN und BMUV [2023] 35 m, 70 m oder 140 m, d.h. die Werte verdoppeln sich jeweils. Dieses Verhalten ist analog zum von Fehrenbach et al. (2021b) angewendeten Prinzip der Verdoppelung bzw. Halbierung der Faktoren der Hemerobie-Klassen. Wenn nun die kleinste Pufferzone (35 m) der Hemerobie-Klasse VII zugeordnet wird und die Verdoppelung der Pufferzonenwerte gleichgesetzt wird mit der Verdoppelung der Faktoren der Hemerobie-Klassen, so fallen alle Verkehrsinfrastrukturelemente mit einer Pufferzone von 70 m in die Hemerobie-Klasse VII*. Dies umfasst sonstige Straßen, Bahnstrecken mit Barrierewirkung sowie Seeschiffahrtsstraßen. Die Bundesautobahnen fallen in dieser Logik in die Klasse VII**.

Punktuelle Infrastruktur, wie Logistikzentren, muss von linearer Infrastruktur unterschieden und analog zu Siedlungsflächen betrachtet werden. Die versiegelte Fläche von Siedlungsflächen wird im Hemerobie-Konzept in die Hemerobie-Klasse VII eingestuft. Eine differenzierte Bewertung von Flächen, die nicht voll versiegelt, jedoch den Siedlungsflächen zuzuordnen sind, wie etwa Spielplätze, Friedhöfe etc., also einen eindeutigen anthropogenen Nutzen aufweisen, ist im derzeitigen Hemerobie-Konzept nicht möglich. Um eine Bewertung der Trennwirkung von punktueller Infrastruktur vornehmen zu können, muss zuerst die grundlegende Frage geklärt werden, wie die Trennwirkung der Siedlungsflächen einzuschätzen ist. Hier spielen Effekte wie die Verinselung von Lebensräumen, die Größe und Durchlässigkeit der Siedlungsflächen, die Dichte der Siedlungsgebiete zueinander etc. eine Rolle. Hierfür bieten die zur Verfügung stehenden Bewertungsmethoden noch keine Antwort. Folglich wird im Rahmen dieses Projektes die Flächenbelegung der Logistikzentren entsprechend des derzeit verfügbaren Hemerobie-Konzeptes bewertet, ohne die Trennwirkung mit einzubeziehen (siehe Abbildung 37).

3.3 Beispielhafte Anwendung des Vorschlags

An dieser Stelle folgt eine beispielhafte Anwendung des oben erarbeiteten Vorschlags zur Einbindung der Trennwirkung von Verkehrsinfrastruktur unter Berücksichtigung der Flächeninanspruchnahme der jeweiligen Verkehrsart. Der oben erarbeitete explorative Ansatz ist konzeptionell fundiert. Eine Validierung der enthaltenden Annahmen und Daten, wie oben erläutert, wäre noch erforderlich, kann jedoch im Rahmen dieses Vorhabens nicht vorgenommen werden. Die nachfolgenden Ergebnisse geben daher lediglich eine erste Orientierung.

3.3.1 Flächendaten der einzelnen Verkehrsarten

Jede Verkehrsart benötigt Fläche in Form von Straßen, Gleisen, Start- und Landebahnen oder Fahrrinnen. Der Flächenbedarf hat sich in den Jahren von 2016 bis 2021 laut des Statistischen Bundesamt nicht wesentlich verändert (Destatis 2023). Allerdings sind die dort verfügbaren Nutzungsdaten zur Bodenfläche nicht so fein aufgliedert, wie es für diese beispielhafte Abschätzung der potentiellen Umweltwirkungen des Flächenbedarfs adäquat wäre. Aus diesem Grund wird auf die Flächendaten von (Allekotte et al. 2020) mit Bezugsjahr 2017 auch für das

Jahr 2019 zurückgegriffen. Die Aggregation der Flächen für Flug-, Schiffs- und Bahnverkehr wurde hier der Übersicht halber vorgenommen.

Tabelle 28: Teilaggregierte Flächenbelegung durch die Infrastruktur für die einzelnen Verkehrsarten nach (Allekotte et al. 2020).

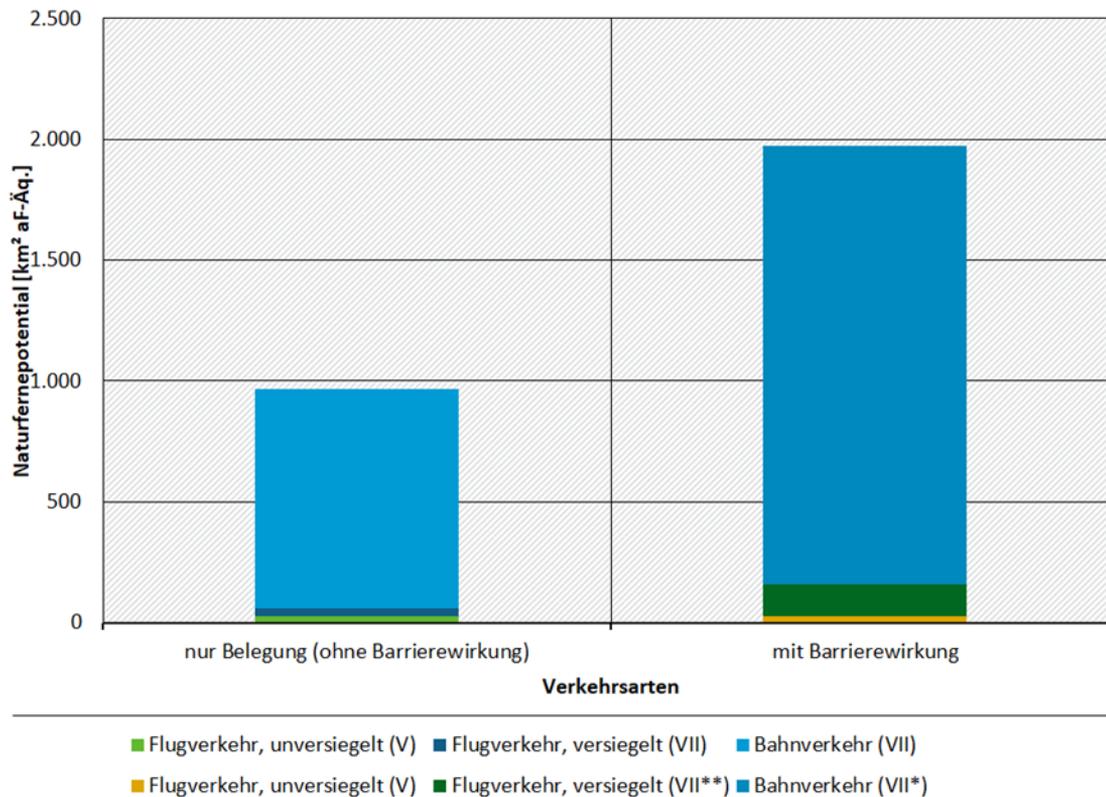
Verkehrsart	Summe der belegten Fläche [km ²]
Flugverkehr, versiegelt	32,77
Flugverkehr, unversiegelt	113,09
Schiffsverkehr	326,98
Bahnverkehr	906,98
Straßenverkehr	
Bundesautobahnen	332,82
Bundesstraße	325,11
Landstraße	547,88
Kreisstraße	504,92
Gemeindestraße	2.568,01
Sonstige Straßen	143,66
Summe (ohne Schiffsverkehr)	5.390

Die Flächendaten der Logistikimmobilien sind in Kapitel 1.7.2 zu finden. Eine graphische Darstellung erfolgt in Kapitel 3.3.2.

3.3.2 Potentielle Auswirkungen der Flächenbelegung und Trennwirkung durch Verkehrsarten

Anhand der in Tabelle 28 aufgeführten Flächenangaben und den in Kapitel 3.1 ausgeführten pauschalen Zuordnung dieser Flächen in die Hemerobie-Klasse VII ergeben sich so die jeweiligen Größen für die jeweilige Verkehrsart. Wird der in Kapitel 3.2.3 erarbeitete Vorschlag zur Aufnahme der Trennwirkung in die Bewertung mit einbezogen, so ergibt sich für den Flugverkehr eine versiegelte Fläche der Klasse VII** von 131,08 km² aF-Äq und eine unversiegelte Fläche der Klasse V von 28,27 km² aF-Äq. Der Bahnverkehr kommt auf eine Fläche der Klasse VII* von 1813,96 km² aF-Äq. Dies ist in Abbildung 35 noch einmal grafisch dargestellt.

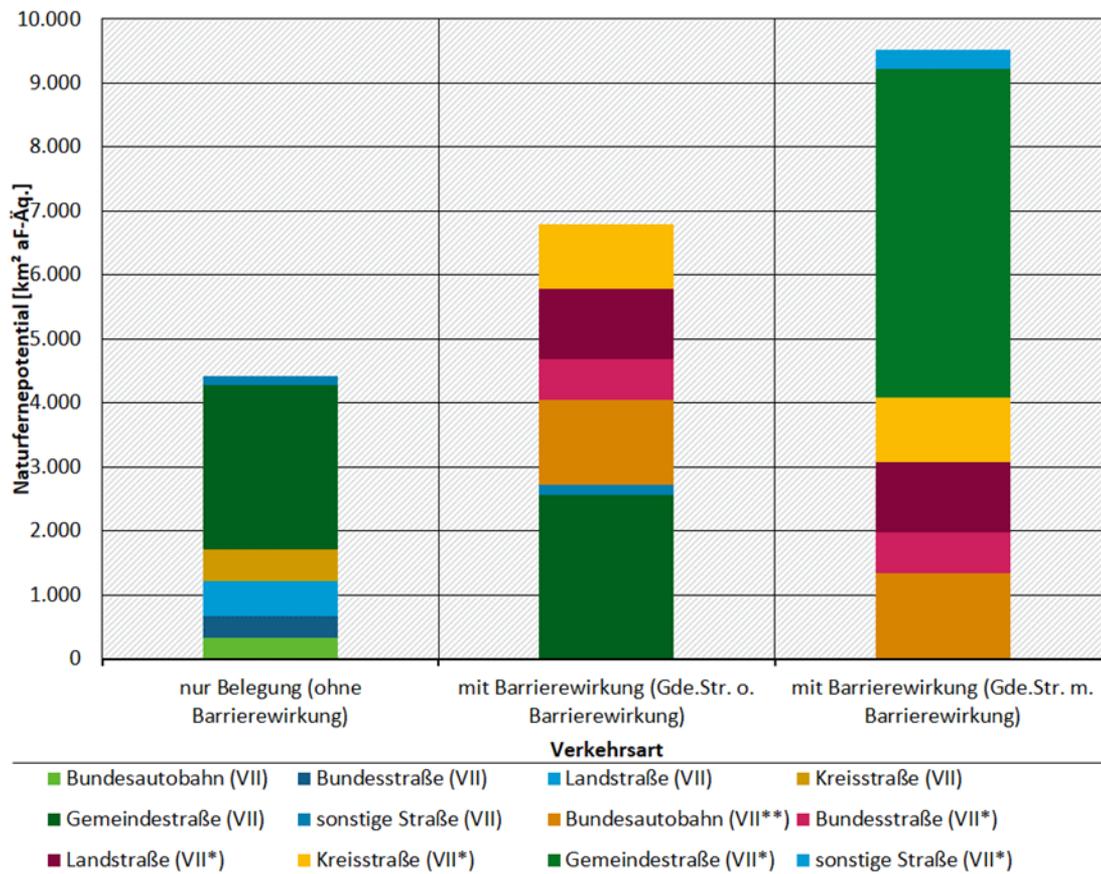
Abbildung 35: Flächenbelegung und Trennwirkung der Verkehrsarten Flug- und Bahnverkehr.



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Die vorliegenden Flächendaten (Tabelle 28) sind nach Straßenart aufgeteilt und erlauben so die Anwendung des Vorschlages auf Ebene der Straßenklassifikation. Bundesautobahnen erreichen mit Anwendung des erarbeiteten Vorschlags so die Klasse VII** mit einer Fläche von 1331,28 km² aF-Äq. Bundesstraßen (650,22 km² aF-Äq), Landstraßen (650,22 km² aF-Äq) und Kreisstraßen (1009 km² aF-Äq) werden in Klasse VII* eingeteilt. Die Anwendung des Ansatzes auf Gemeindestraßen und niedrigere Klassen ist noch nicht ausreichend geprüft. Aufgrund des hohen Anteils dieser Straßen an der Gesamtbelegung für Verkehrsflächen können sie für das Ergebnis jedoch überaus relevant sein. Für die beispielhafte Anwendung hier werden somit die zwei Extremfälle dargestellt: Worst case: Gemeindestraßen (Gde.Str.) werden wie Landstraßen eingestuft; Best case: Gemeindestraßen wird keine Barrierewirkung zugewiesen. Werden Gemeindestraßen und sonstige Straßen als Straßen mit Barrierewirkung eingestuft (worst case), so liegt hier flächenmäßig bei den Gemeindestraßen mit 5136,02 km² aF-Äq der größte Anteil vor. Sonstige Straßen liegen folglich bei 287,32 km² aF-Äq. Beide Straßenarten würden so auch in Hemerobie-Klasse VII* eingestuft werden. Grafisch ist dies noch einmal in Abbildung 36 dargestellt.

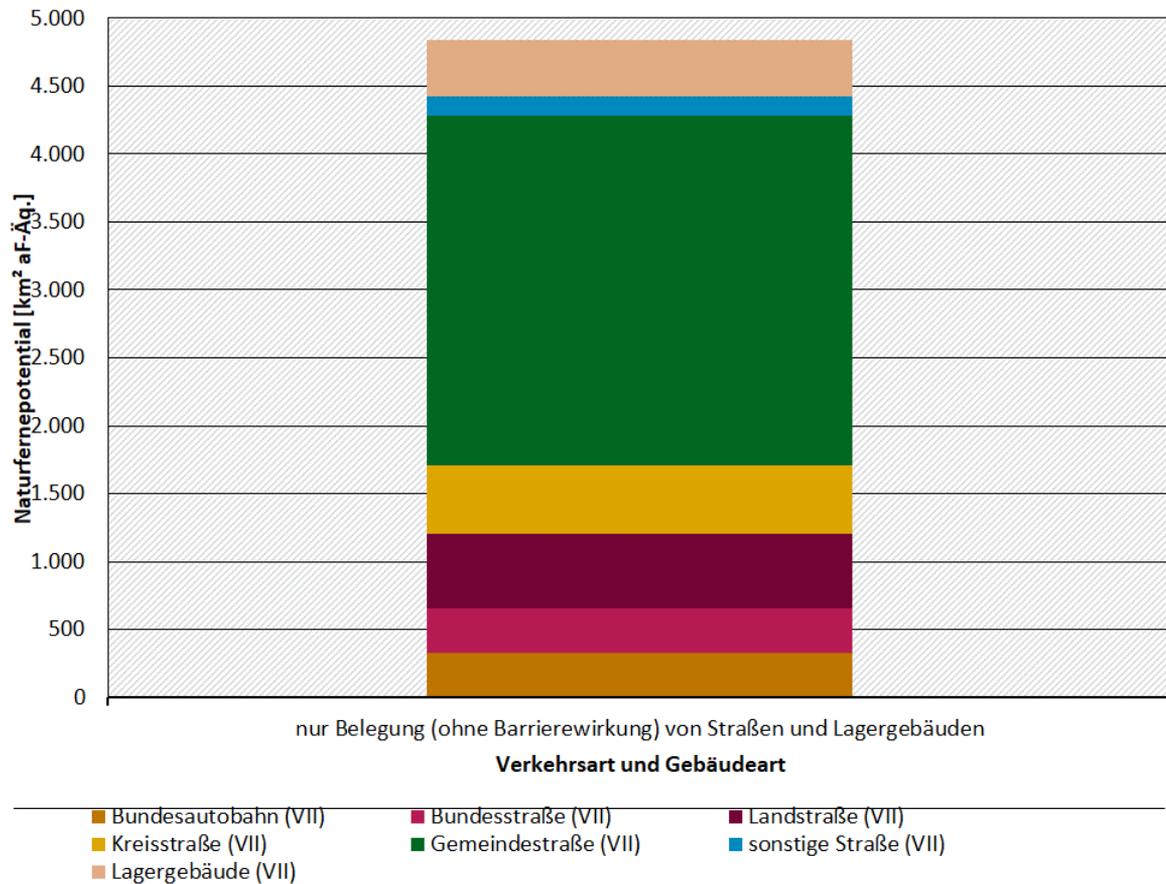
Abbildung 36: Flächenbelegung und Trennwirkung der Verkehrsart Straßenverkehr mit reiner Flächenbelegung (links), Flächenbelegung und Trennwirkung ohne Gemeindestraßen und sonstige Straßen (mittig, best case) und mit Gemeinde- und sonstigen Straßen (rechts, worst case).



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Die Flächenbelegung durch Straßen und Logistikimmobilien sind hier (Abbildung 37) graphisch dargestellt. Beide Flächenbelegungen sind nach dem bestehenden Hemerobie-Konzept ohne Trennwirkung bewertet.

Abbildung 37: Flächenbelegung der Verkehrsart „Straßenverkehr“ und der Logistikimmobilien ohne Trennwirkung.



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

A Anhang: Daten und Methoden zur Berechnung der Umweltwirkungen

Die folgenden Abschnitte beschreiben die verwendeten Daten und Methoden, mit welchen die Umweltwirkungen des Güterverkehrs ermittelt wurden.

A.1 Seeschifffahrt

A.1.1 Vorwort

Die bestehenden THG-Bilanzen des Umweltbundesamts umfassen nur einen Teil der Gütertransporte über den Seeweg. Der nationale Inventarbericht (NIR) beinhaltet beispielsweise nur die THG-Emissionen der nationalen Schifffahrt sowie informatorisch die THG-Emissionen des internationalen Seeverkehrs, welche anhand des Kraftstoffabsatzes in deutschen Seehäfen bestimmt werden (UBA 2021b). Die Daten sind daher nur sehr eingeschränkt zur Beschreibung der Umweltwirkungen des Seegüterverkehrs geeignet.

Analysen des UBA-Projekts PULK nach dem Quell-Ziel-Prinzip umfassen auch internationale Verkehre sowie eine Unterscheidung nach Güterarten und sind daher wesentlich aussagekräftiger für die Umweltwirkungen des Seeverkehrs (Opitz et al. noch unveröffentlicht). Allerdings werden dort nur Transporte über deutsche Seehäfen betrachtet. Somit wird vernachlässigt, dass ein Großteil der Seeverkehre über ausländische Häfen und anschließend auf dem Landweg im- oder exportiert wird.

Daher wurde in diesem Projekt eine weitere Berechnung durchgeführt, welche in den folgenden Abschnitten erläutert wird. Deren Ergebnisse werden im Bericht den Daten des NIR zur Diskussion gegenübergestellt.

A.1.2 Erläuterung der Datenquellen

Die in diesem Kapitel beschriebenen Berechnungen der Emissionen der Seeschifffahrt im Jahr 2019 beruhen auf den folgenden Datenquellen:

- ▶ DESTATIS (genesis-online): Statistik 46331 (Seeverkehrsstatistik) (DESTATIS 2023c)
 - Tabelle 46331-0005
 - Tabelle 46331-0007
- ▶ DESTATIS (genesis-online): Statistik 51000 (Außenhandel) (DESTATIS 2023b)
 - Tabelle 51000-0003
 - Tabelle 51000-0007
- ▶ EcoTransIT World (Anthes et al. 2022)
- ▶ Zur Prognose der THG-Emissionen im Jahr 2050 wurden zusätzlich die vierte THG-Studie der internationalen Seeschifffahrts-Organisation (Faber et al. 2021) sowie die gleitende Langfristprognose des BMDV (Intraplan/Trimode 2023) herangezogen.

A.1.3 Bilanzgrenzen

Im Rahmen dieses Projekts wurden die Emissionen der Seeschifffahrt wie folgt abgegrenzt: Das Ziel war es, Deutschland diejenigen Emissionen zuzurechnen, die durch Handlungen auf deutschem Boden verursacht werden, d. h. die mit deutschen Im- bzw. Exporten in Verbindung stehen. Dies bedeutet, dass die Seeschifffahrtsemissionen unabhängig vom Start- bzw. Zielhafen berücksichtigt wurden, sofern die Transportkette ihren Ursprung oder ihr Ziel in Deutschland hat. Im Gegensatz dazu wurden die Seeschifffahrtsemissionen von Waren, die zwar an deutschen Häfen umgeschlagen wurden, aber nicht von Deutschland im- oder exportiert wurden, nicht berücksichtigt. Von den auf diese Weise berechneten Emissionen wird Deutschland die Hälfte zugeordnet.

A.1.4 Güteraufkommen

Zur Ermittlung des Güteraufkommens im Jahr 2019 wurde für außereuropäische Länder²³ die Außenhandelsstatistik (DESTATIS 2023b) herangezogen und angenommen, dass das Güteraufkommen des Seeverkehrs für diese Länder in guter Näherung dem in der Außenhandelsstatistik ausgewiesenen Gewicht der aus- und eingeführten Waren entspricht. Diesem Vorgehen liegt die Überlegung zugrunde, dass alle exportierten Güter in das Bestimmungsland gelangen müssen (und umgekehrt für Importe) und dass, sofern keine Landverbindung existiert oder die Entfernungen sehr weit sind, der allergrößte Teil der Transporte (bezogen auf das Güteraufkommen) per Seeschiff erfolgt (Makait et al. 2014). Nicht berücksichtigt wurden Staaten, deren Im- und Exporte von bzw. nach Deutschland im Jahr 2019 in Summe weniger als 100.000 t ausmachten. Die aus diesem Grund vernachlässigten Länder stehen zusammen für ein Prozent der aus dem bzw. in das außereuropäische Ausland im- und exportierten Waren (bezogen auf das Güteraufkommen).

Innerhalb des europäischen Kontinents ist es nicht möglich, sich auf die Außenhandelsstatistik zu stützen, da ein großer Teil des Güterverkehrs bodengebunden erfolgt. Daher wurde zur Bestimmung des innereuropäischen Güteraufkommens im Seeverkehr auf die Seeverkehrsstatistik (DESTATIS 2023c) zurückgegriffen. Diese liefert zwar das Güteraufkommen aus Im- und Exporten über deutsche Seehäfen, unterscheidet jedoch nicht nach Transporten, deren Ursprungs-/Zielland Deutschland ist und solchen, die Deutschland nur als Transit durchqueren. Angesichts des geringen Anteils innereuropäischer Transporte am internationalen Seeverkehr Deutschlands (siehe Abbildung 17) erscheint es dennoch vertretbar, an dieser Stelle die Seeverkehrsstatistik zu verwenden.

Als Resultat des bis hierher beschriebenen Prozesses, erhält man das Güteraufkommen im Seeverkehr differenziert nach Partnerland sowie nach Ein- und Ausfuhr.

A.1.5 Bestimmung der zurückgelegten Distanzen

Zur Bestimmung der mit dem Seeschiff zurückgelegten Distanzen wurden die Partnerländer in drei Gruppen aufgeteilt:

- ▶ Alle Transporte mit Ziel bzw. Ursprung in einem Ostseeanrainerstaat wurden den Ostseehäfen zugeordnet.

²³ In diesem Zusammenhang werden Russland und die Türkei als europäische Staaten behandelt, Island hingegen nicht.

- ▶ Alle Transporte mit Ziel bzw. Ursprung in einem östlichen oder südlichen Mittelmeeranrainerstaat wurden den Mittelmeerhäfen²⁴ zugeordnet.
- ▶ Alle anderen Transporte wurden den Nordseehäfen zugeordnet.

Die mit dem Seeschiff zurückgelegten Entfernungen wurden mittels EcoTransIT World (IVE 2023) bestimmt. Dazu wurde pro Partnerland in der Regel je ein repräsentativer Hafen gewählt. Zwischen diesem Hafen und einem Hafen auf „deutscher“ Seite (Hamburg für die Länder, die den Nordseehäfen zugeordnet wurden, Rostock für die Länder, die den Ostseehäfen zugeordnet wurden und Venedig für die Länder, die den Mittelmeerhäfen zugeordnet wurden) wurde die Reisedistanz durch das Routing von EcoTransIT World berechnet.

Für einige Länder mit Küsten an mehreren Meeren²⁵ wurden mehrere repräsentative Häfen gewählt und für jeden von diesen die Entfernung bestimmt. In diesem Fall wurde das zuvor bestimmte Güteraufkommen anhand der Seeverkehrsstatisik auf die verschiedenen Küstengebiete aufgeteilt.

Durch Multiplikation von Güteraufkommen und Distanz ergibt sich die Verkehrsleistung je Partnerland bzw. Küstengebiet, differenziert nach Im- und Export.

A.1.6 Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren wurden gemeinsam mit den Entfernungen mittels EcoTransIT World je Partnerland/Küstengebiet bestimmt. Sie hängen von einer Vielzahl von Einflussgrößen ab, wobei zwei Faktoren eine besonders wichtige Rolle spielen. Dies ist zum einen die Größe des Schiffes, welche wiederum von der Trade Lane abhängt und von EcoTransIT World über Default-Werte automatisch berücksichtigt wird. Zum anderen hat die Art des Schiffes (Containerschiff oder Massengutfrachter) einen großen Einfluss auf die Emissionsfaktoren. Aus diesem Grund wurden die Emissionsfaktoren für jedes Partnerland/Küstengebiet zweimal bestimmt: einmal für ein Containerschiff und einmal für einen Massengutfrachter. Die Aufteilung der Verkehrsleistung auf die beiden Schiffstypen erfolgte für außereuropäische Staaten anhand der Klassifizierung der Im- und Exporte nach dem Warenverzeichnis Außenhandelsstatistik (genesis-online-Tabelle 51000-0007) und für europäische Staaten anhand der Einteilung in Gütergruppen (genesis-online-Tabelle 46331-0005). Hierbei wurde zuerst für die Gütergruppen nach NST-2007 (DESTATIS 2008) auf Grundlage der Seeverkehrsstatisik (DESTATIS 2023c) eine Zuordnung zu Containerschiffen bzw. Massengutfrachtern vorgenommen²⁶ und diese iterativ verbessert, bis die so für den Hamburger Hafen bestimmten jeweiligen Gesamtmengen der Realität entsprachen²⁷. Anschließend wurde diese Zuordnung auf die Systematik der Außenhandelsstatistik auf Ebene der Zweisteller (DESTATIS 2021) übertragen.

Aus der Multiplikation von Verkehrsleistung und Emissionsfaktor ergeben sich letztendlich die Emissionen, von denen Deutschland die Hälfte zugewiesen wird.

²⁴ Es gibt offensichtlich keine deutschen Mittelmeerhäfen, aber Transportketten aus Deutschland via (z. B. italienische) Mittelmeerhäfen in andere Länder.

²⁵ Frankreich, Schweden, Spanien, Russland, Türkei, USA, Kanada, Saudi-Arabien, Kolumbien und Mexiko

²⁶ Tabelle 46331-0006 der Seeverkehrsstatisik weist das Güteraufkommen pro Gütergruppe sowohl in Tonnen als auch in Ladeeinheiten aus (DESTATIS 2023c).

²⁷ vgl. Tabelle 46331-0007 der Seeverkehrsstatisik (DESTATIS 2023c)

A.1.7 Prognose für das Jahr 2050

Aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit²⁸ konnten die Treibhausgasemissionen der Seeschifffahrt im Jahr 2050 nur grob abgeschätzt werden. Bezüglich des Güteraufkommens wurden die in (Intraplan/Trimode 2023) prognostizierten Entwicklungen im Außenhandel nach Im- und Export sowie nach Stück- und Massengütern auf die für das Jahr 2019 verwendeten Güteraufkommen pro Partnerland/Küstengebiet übertragen, um das Güteraufkommen im Jahr 2050 zu errechnen. Aus dem so bestimmten Güteraufkommen wurde analog zum Jahr 2019 die Verkehrsleistung berechnet.

Für die Emissionsfaktoren wurde nach (Faber et al. 2021) angenommen, dass die THG-Emissionen pro Tonnenkilometer bis zum Jahr 2050 um durchschnittlich 25 % sinken. Hinsichtlich der Vorkettenemissionen wurde der konservative Ansatz gewählt, dass diese im Verhältnis zu den direkten Emissionen konstant bleiben. Aufgrund fehlender Daten wurde von einer Prognose der Luftschadstoffemissionen im Jahr 2050 abgesehen.

A.2 Luftverkehr

A.2.1 Vorwort

Die in diesem Bericht in Bezug auf den Luftfrachtverkehr gezeigten Daten (Realdaten und Trendszenario) wurden zu großen Teilen dem TREMOD- bzw. TREMOD-AV-Modell entnommen (ifeu 2023). Daher werden an dieser Stelle hinsichtlich der Methodik nur grundlegende Punkte wiedergegeben sowie die Berechnung der nicht aus TREMOD stammenden Resultate näher erläutert. Für detaillierte Informationen zu TREMOD und TREMOD-AV sei auf die zugehörige Dokumentation verwiesen, z. B. (Allekotte et al. 2024) sowie (Knörr et al. 2012).

A.2.2 Bilanzgrenzen

In TREMOD-AV wird nach dem Standortprinzip bilanziert, d. h. es werden alle Flüge betrachtet, die von deutschen Flughäfen abgehen. Ein Flug gilt in diesem Sinne nach der ersten Landung als abgeschlossen. Somit werden Streckenteile nach einer möglichen Zwischenlandung nicht berücksichtigt. Im Rahmen dieses Projekts wurde mittels der weiter unten beschriebenen Zuschätzung versucht, die THG-Emissionen des in TREMOD-AV nicht enthaltenen Teils der Flugstrecke sowie möglicher Weiterflüge nach Umladungen abzuschätzen. Diese Zuschätzung ist allein in Abbildung 24 sowie in der zugehörigen Textpassage enthalten.

Die Betrachtung umfasst sowohl reine Frachtflüge als auch Güterverkehr mit Passagiermaschinen, d. h. sogenannte Belly-Fracht. Im letzteren Fall werden die Emissionen nach dem Prinzip der Verkehrseinheiten auf Passagiere und Fracht alloziert: Eine Person inkl. Gepäck entspricht 100 kg Fracht (Fraport 2020).

²⁸ Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie waren die Ergebnisse der gleitenden Langfristprognose des BMDV nur als Foliensatz, jedoch nicht als ausführlicher Bericht bzw. in der Form von Verflechtungsmatrizen verfügbar.

A.2.3 Zuschätzung für Strecken nach der ersten (Zwischen-)Landung

Die in TREMOD-AV verwendete Bilanzgrenze (abgehende Flüge bis zur ersten (Zwischen-)Landung) ist nicht geeignet, um die Umweltwirkungen des durch deutsche Exporte hervorgerufenen Luftverkehrs vollständig zu erfassen, da

- ▶ Frachtflugzeuge des Öfteren aus wirtschaftlichen Gründen einen Zwischenstopp einlegen (Betankung mit günstigem Kerosin, Reduzierung des Treibstoffgewichts und damit Steigerung der transportierbaren Fracht),
- ▶ Frachtflugzeuge ihre Ladung teils sukzessive bei mehreren Stopps ausladen und
- ▶ Fracht in manchen Fällen mit mehreren Flugzeugen zum Ziel transportiert wird, d. h. auf dem Weg umgeladen wird.²⁹

Daher erschien es im Rahmen dieses Projektes notwendig, die Größenordnung der nicht erfassten Emissionen abzuschätzen. Da die vorliegenden Verkehrsstatistiken keine Informationen diesbezüglich enthalten, wurde die Außenhandelsstatistik (DESTATIS 2023b) hierfür herangezogen. Dabei wurden nur Exporte auf andere Kontinente betrachtet, da innereuropäische Transporte vom beschriebenen Problem vermutlich kaum betroffen sind und die verwendete Methode nur auf außereuropäische Exporte anwendbar ist.

Die Grundannahme des hier beschriebenen Vorgehens ist, dass ein großer Teil der per Luftfracht transportierten Güter werthaltig sind, d. h. der Quotient Wert (in US-Dollar) durch Gewicht (in Tonnen) groß ist (Kleiser 2010; Schäfer 2020). Folglich wurde auf Grundlage der Außenhandelsstatistik (Export)³⁰ für jedes Partnerland und für jede Warengruppe nach dem Warenverzeichnis Außenhandelsstatistik auf der Ebene der Zweisteller (DESTATIS 2021) der Quotient Wert pro Gewicht berechnet. Darauf aufbauend wurden alle Exporte oberhalb des Grenzwerts von 34,5 USD/t dem Luftverkehr zugeordnet. Dieser Grenzwert wurde so gewählt, dass das resultierende Güteraufkommen (in Tonnen) dem Güteraufkommen im Luftverkehr lt. Verkehrsstatistiken entspricht (jeweils ausgenommen Verkehr nach Europa). Die THG-Emissionen ergeben sich aus dem Güteraufkommen durch Multiplikation mit der Distanz (Großkreisentfernung plus Umwegfaktor) und dem nach Land differenzierten Emissionsfaktor aus TREMOD-AV. In den wenigen Fällen, in denen in TREMOD-AV kein Emissionsfaktor für ein Land gegeben war, wurde stattdessen der globale Durchschnitt verwendet. Durch Summation über alle Länder und Addition der THG-Emissionen des innereuropäischen Luftfrachtverkehrs laut TREMOD-AV erhält man die gesamten THG-Emissionen des Luftfrachtverkehrs, welcher durch Exporte aus Deutschland hervorgerufen wird. Diese sind 16% höher als die in TREMOD-AV gegebenen Emissionen. Hierbei ist zu beachten, dass es sich bei diesem Wert um eine sehr grobe Abschätzung handelt, die auf vielen Annahmen und Vereinfachungen beruht und dementsprechend mit einer sehr großen Unsicherheit behaftet ist.

²⁹Transite mit Umladungen in Deutschland werden nicht von der Bilanzgrenze erfasst. Diese Transitverkehre konnten aus methodischen Gründen bei der Zuschätzung nicht abgezogen werden. Dies trägt zu einer weiteren Unsicherheit in den Werten bei, allerdings ist davon auszugehen, dass der dadurch entstehende Fehler kleiner als die sonstige methodische Unsicherheit ist, da Transite nur einen kleinen Teil des Luftfrachtverkehrs ausmachen (Fraport 2020).

³⁰ Tabelle 51000-0007

A.3 THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung und Infrastruktur

Tabelle 29: Abschätzung der THG-Emissionen für die Fahrzeugherstellung und Verkehrsinfrastruktur des deutschen Güterverkehrs (Verkehrsleistung 2019)

Fahrzeug-kategorie	Fahr/-Verkehrsleistungen	Einheit	Infrastr. gCO _{2e} /tkm	Fahrzeuge gCO _{2e} /tkm	Infrastr. Mio. t CO _{2e}	Fahrzeuge Mio. t CO _{2e}
LNF	53,7	Mrd. km	31,7	49,5	1,7	2,7
Lkw 3,5-7,5	7,4	Mrd. tkm	10,8	39,9	0,1	0,3
Lkw 7,5-12	4,8	Mrd. tkm	7,3	16,3	0,0	0,1
Lkw>12	31,3	Mrd. tkm	3,8	12,8	0,1	0,4
LZ/SZ	455,0	Mrd. tkm	2,8	7,7	1,3	3,5
Flug	12,2	Mrd. tkm	24,3	1,2	0,3	0,01
Bahn	133,6	Mrd. tkm	12	2	1,6	0,3
BiSchi	50,9	Mrd. tkm	8,1	1,7	0,4	0,1
Summe					5,5	7,3

Quelle: eigene Berechnung anhand der Emissionsfaktoren pro tkm für das Jahr 2017 aus (Allekotte et al. 2020) und Fahr- und Verkehrsleistungen im Jahr 2019 aus TREMDO 6.43

A.4 Methoden zur Allokation von Fläche

Verkehrsinfrastruktur kann von unterschiedlichen Verkehrsarten in Anspruch genommen werden. Beispielsweise werden Straßen nicht nur vom Individualverkehr in Anspruch genommen, sondern auch durch den Gütertransport. Daher kann die zugrundeliegende Flächeninanspruchnahme nicht nur einem Verkehrsmittel zugerechnet werden. Eine Allokation der belegten Fläche und der damit einhergehenden Umweltwirkungen ist notwendig.

Die Flächeninanspruchnahme, mit der in diesem Kontext die temporäre Flächenbelegung gemeint ist, bezieht sich auf die Fläche, deren natürliche Umweltbedingungen so verändert wurden, dass sie für die Bereitstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung geeignet sind. Dieser Zustand wird mindestens für die Dauer der Flächenbelegung aufrechterhalten. Die Umweltwirkung ergibt sich hier aus dem Qualitätsunterschied der belegten Fläche bezogen auf einen Referenzzustand (Koellner et al. 2013; Milà i Canals et al. 2006). Da Verkehrsträger auf jeweilige Verkehrsinfrastrukturen angewiesen sind, belegen sie in der Folge Fläche durch die jeweilige Infrastruktur. Diese Belegung und die Anteile an den sich daraus generierenden flächenbezogenen Umweltwirkungen muss den Verkehrsmitteln zugerechnet, d. h. auf diese alloziert werden, da die Verkehrsinfrastruktur meist von verschiedenen Verkehrsmitteln geteilt wird.

Zu diesem Zweck werden hier bereits bestehende Allokationsmethoden von (Allekotte et al. 2020), Fehrenbach et al. (2021a) und ecoinvent (Spielmann et al. 2007) gegenübergestellt. (Tabelle 30).

Tabelle 30: Vergleich der Allokationsmethoden von Fläche auf Verkehrsträger.

	(Allekotte et al. 2020)		Fehrenbach et al. (2021a)	ecoinvent (Spielmann et al. 2007)
Referenzeinheit	tkm bzw. pkm		tkm bzw. pkm	tkm bzw. pkm
Einheit Flächenbelegung	m ² *a		m ² *a	m ² *a
Einheit Flächennutzungsänderung	m ²		m ²	m ²
Allokation der Fläche auf Nutzungsträger auf Basis von	Anhand von zwei Varianten		(Allekotte et al. 2020), bei Varianten, die Variante B	Nutzungsspezifischen Nachfragefaktoren
	Variante A	Variante B		
Straßenverkehr	Flächenzeit pro Fahrzeugtyp [m ² sec/Fzkm]	(Fahrzeuglänge* Fahrspurweite) multipliziert mit Fahrleistungen der Fahrzeuge [m ² *Fzkm]		Gesamtstraßennetz *prozentualer Anteil des Transportmodus an Gesamttransportleistung / spezifische Nettotransportleistung des Transportmodus
Schienenverkehr	Flächenzeit pro Fahrzeugtyp [m ² sec/Fzkm]	(Fahrzeuglänge* Fahrspurweite) multipliziert mit Fahrleistungen der Fahrzeuge [m ² *Fzkm]		Fahrzeugkilometerleistung
Binnenschifffahrt	Keine Allokation, da nur ein Fahrzeugtyp			Beförderte Gesamttonnage
Luftverkehr	Anzahl der Start- und Landungen je Personen- und Güterverkehr			Keine Allokation

A.5 Emissionsfaktoren urbane Logistik

Tabelle 31: Verwendete Emissionsfaktoren für Fahrzeuge der urbanen Logistik

Segment und Fahrzeugtyp	Antrieb	Kraftstoffverbrauch	CO _{2e} TTW	CO _{2e} WTW	NO _x TTW	PM _{2,5} TTW (Auspuff)
		l/100km	g/km	g/km	mg/km	mg/km

Segment und Fahrzeugtyp	Antrieb	Kraftstoffverbrauch	CO _{2e} TTW	CO _{2e} WTW	NO _x TTW	PM _{2,5} TTW (Auspuff)
KEP						
Fahrzeuge N1 B2C	Diesel	10,4	257	335	729	21
Fahrzeuge N1 B2B	Diesel	10,4	257	335	729	21
Fahrzeuge N2 B2B	Diesel	18,6	460	600	2.068	29
Fahrzeuge N1 B2C	BEV	-	-	165	-	-
Fahrzeuge N1 B2B	BEV	-	-	165	-	-
Fahrzeuge N2 B2B	BEV	-	-	346	-	-
Abfalllogistik						
26t zGG*	Diesel	60	1.489	1.941	3.250	28
26t zGG	Erdgas		581	893	577	7
26t zGG	BEV	-	-	471	-	-
40t zGG	Diesel	44,9	1.118	1.456	2.045	23
Stückgut						
3,5 t Lkw	Diesel	10,4	257	335	729	21
7,5 t Lkw	Diesel	14,7	366	477	1.886	44
12 t Lkw	Diesel	18,6	460	600	2.068	29
18 t Lkw	Diesel	26,3	655	853	2.595	30
40 t Lkw	Diesel	44,9	1.118	1.456	2.045	23
3,5 t Lkw	BEV	-	-	165	-	-
7,5 t Lkw	BEV	-	-	245	-	-
12 t Lkw	BEV	-	-	346	-	-
18 t Lkw	BEV	-	-	471	-	-
40 t Lkw	BEV	-	-	879	-	-
Handwerker						
Pkw / Kombi	Diesel	8,7	216	281	617	7
Kleintransporter	Diesel	10,4	257	335	729	21
bis 7,5 t	Diesel	14,7	366	477	1.886	44
bis 26t	Diesel	33,6	833	1.086	3.250	28
bis 40t	Diesel	44,9	1.118	1.456	2.045	23
Pkw / Kombi	BEV	-	-	104	-	-
Kleintransporter	BEV	-	-	165	-	-
bis 7,5 t	BEV	-	-	245	-	-

Segment und Fahrzeugtyp	Antrieb	Kraftstoffverbrauch	CO _{2e} TTW	CO _{2e} WTW	NO _x TTW	PM _{2,5} TTW (Auspuff)
bis 26t	BEV	-	-	471	-	-
bis 40t	BEV	-	-	879	-	-
Gastronomie						
bis 7,5t	Diesel	14,7	366	477	1.886	44
über 7,5t bis 12t	Diesel	18,6	460	600	2.068	29
über 12t bis 14t	Diesel	21,2	529	688	1.350	31
über 14t bis 20t	Diesel	26,3	655	853	2.595	30
über 20t bis 26t	Diesel	33,6	833	1.086	3.250	28
über 26t bis 28t	Diesel	35,9	892	1.163	2.530	20
Sattelzüge	Diesel	44,9	1.118	1.456	2.045	23
bis 7,5t	BEV	-	-	245	-	-
über 7,5t bis 12t	BEV	-	-	346	-	-
über 12t bis 14t	BEV	-	-	471	-	-
über 14t bis 20t	BEV	-	-	471	-	-
über 20t bis 26t	BEV	-	-	471	-	-
über 26t bis 28t	BEV	-	-	471	-	-
Sattelzüge	BEV	-	-	879	-	-

Quelle: ifeu-Berechnungen auf Basis TREMOD 6.43; Durchschnittliche Emissionsfaktoren für die bundesweite Fahrzeugflotte im Jahr 2022 auf Innerortsstraßen. Die Zuteilung der Fahrzeugtypen zu TREMOD auf Basis erfolgte der Fahrzeug-/Gewichtsklasse * Kraftstoffverbrauch Abfalllogistik 26 t auf Basis Annahme IML, CO_{2e} entsprechend angepasst.

4 Quellenverzeichnis

Allekotte, M.; Bergk, F.; Biemann, K.; Deregowski, C.; Knörr, W.; Althaus, H.-J.; Sutter, D.; Bergmann, T. (2020): Ökologische Bewertung von Verkehrsarten. UBA TEXTE 156/2020 ifeu, INFRAS, Öko-Institut. Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA), Dessau. S. 237.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_156-2020_oekologische_bewertung_von_verkehrsarten_0.pdf (29.10.2020).

Allekotte, M.; Biemann, K.; Heidt, C.; Colson, M.; Knörr, W.; Kräck, Jan (2024): Aktualisierung des Daten- und Rechenmodells: „Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland (TREMOMM)“ und der Datenbank „Mobile Maschinen und Geräte (TREMOMM)“ 2022. Texte 76/2024 ifeu im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/76_2024_texte_tremod_.pdf (05.05.2024).

Allekotte, M.; Heidt, C.; Schneider, C.; Tönges-Schuller, N. (2023): Bewertung von Emissionsminderungspotenzialen zusätzlicher Verkehrsmaßnahmen. ifeu und AVISO im Auftrag des Umweltbundesamtes.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/110_2023_texte_bewertung_von_emissionsminderungspotenzialen_zusaetzlicher_verkehrsmassnahmen.pdf (08.08.2023).

Allekotte, M.; Kräck, J.; Knörr, W.; Wozny, F. (noch unveröffentlicht): Weiterentwicklung TREMOD - Clustermodell Flugverkehr - Integration von Nicht-CO2-Effekten in TREMOD-AV. im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Anders, S. (2015): Lebensmitteldiscounter und Supermarkt. Untersuchung zu Verkehrseffekten, Einzugsgebieten, Vorlieben der Kunden und zum Genehmigungsprozess vor dem Hintergrund der Regelungen des § 11 Abs. 3 BauNVO. In: *Raumforschung und Raumordnung | Spatial Research and Planning*. Vol. 73, No. 3, S. 219–232. DOI: 10.1007/s13147-015-0340-0.

Andrasi, B.; Jaeger, J. A. G.; Heinicke, S.; Metcalfe, K.; Hockings, K. J. (2021): Quantifying the road-effect zone for a critically endangered primate. In: *Conservation Letters*. Vol. 14, No. 6. DOI: 10.1111/conl.12839.

Anthes, R.; Notter, B.; Biemann, K.; Dobers, K.; Knörr, W.; Heidt, C.; Althaus, H.-J. (2022): EcoTransIT World - Environmental Methodology and Data - Update 2022. https://www.ecotransit.org/wp-content/uploads/20220908_Methodology_Report_Update_2022_Website.pdf (19.07.2023).

Arlotto, A.; Steele, J. M. (2016): Beardwood–Halton–Hammersley theorem for stationary ergodic sequences: A counterexample. In: *The Annals of Applied Probability*. Vol. 26, No. 4, S. 2141–2168. DOI: 10.1214/15-AAP1142.

Balzer, S.; Böttcher, M.; Dietrich, K.; Ellwanger, G.; Euler, U.; Finck, P.; Hendrichke, O.; Krause, J.; Kreutle, A.; Kuhmann, C.; May, R.; Merck, T.; Neukirchen, B.; Scherfose, V.; Schippmann, U.; Schröder, A.; Schröder, N.; Ssymank, A. (2017): Bundeskonzept Grüne Infrastruktur. Grundlagen des Naturschutzes zu Planungen des Bundes. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg. https://www.bfn.de/sites/default/files/2021-08/bkgi_broschuere.pdf (21.07.2023).

BBSR (2018): Verkehrlich-Städtebauliche Auswirkungen des Online-Handels. Bonn.

https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/exwost/Studien/2015/SmartCities/SmartCities-VerkehrOnline/endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (02.04.2024).

Becker, U. (2016): Grundwissen Verkehrsökologie Grundlagen, Handlungsfelder und Maßnahmen für die Verkehrswende. Oekom Verlag, Berlin.

BfN; BMUV (2023): Bemessung von Zerschneidung und Barrierewirkungen in Wildnisgebieten.

<https://www.bfn.de/sites/default/files/2023-07/2023-bemessung-von-zerschneidung-und-barrierewirkungen-in-wildnisgebieten-bfn.pdf> (19.09.2023).

- BIEK (2017): Nachhaltigkeitsstudie 2017: Bewertung der Chancen für die nachhaltige Stadtlogistik von morgen. Berlin. https://www.biek.de/download.html?getfile=BIEK_Nachhaltigkeitsstudie_2017.pdf (02.04.2024).
- BIEK (2018): BIEK-Kompendium „Zahlen, Daten und Fakten der KEP-Branche“: Teil 6. Berlin. https://www.biek.de/presse/meldung/hauszustellung-auf-platz-1-bedeutung-der-paketshops-nimmt-zu.html?file=files/biek/pressemitteilungen/2018/PM_BIEK_Kompendium_Teil_6.pdf (02.04.2024).
- BIEK (2021): BIEK-Kompendium 2021. Berlin. https://www.biek.de/download.html?getfile=BIEK_Kompendium_2021_Regionale_Verteilung_Sendungsvolumen.pdf (02.04.2024).
- BIEK (2023): KEP-Studie 2023 – Analyse des Marktes in Deutschland. Berlin. https://www.biek.de/download.html?getfile=BIEK_KEP-Studie_2023.pdf (02.04.2024).
- BIEK (2024): Innenstadtlogistik der Kurier-, Express- und Paketdienste (KEP). Berlin. https://www.biek.de/download.html?getfile=BIEK_Im_Fokus_KEP_Januar%202024.pdf (02.04.2024).
- Biemann, K.; Helms, H.; Münter, D.; Liebich, A.; Pelzeter, J.; Kämper, C. (2024): Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr. UBA. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/13_2024_texte_analyse_der_umweltbilanz_von_kraftfahrzeugen_0.pdf (05.02.2024).
- Bilitewski, B.; Wagner, J.; Reichenbach, J. (2018): Bewährte Verfahren zur kommunalen Abfallbewirtschaftung: Informationssammlung über Ansätze zur nachhaltigen Gestaltung der kommunalen Abfallbewirtschaftung und dafür geeignete Technologien und Ausrüstungen. Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-30_texte_39-2018-verfahren-kommunale-abfallwirtschaft_0.pdf (03.04.2024).
- BMDV (2021): Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV). RegioStaR - Regionalstatistische Raumtypologie für die Mobilitäts- und Verkehrsforschung. Bonn.
- BMEL (2022): Bericht zur Markt- und Versorgungslage mit Fleisch 2022. https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Fleisch/2022BerichtFleisch.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (04.04.2024).
- BMEL (2023a): Verkaufsstätten im Lebensmitteleinzelhandel. Berlin. <https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung/ernaehrungsgewerbe/lebensmitteleinzelhandel> (02.04.2024).
- BMEL (2023b): Einkaufsstätten privater Haushalte für ausgewählte Nahrungsmittel. Berlin. <https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung/ernaehrungsgewerbe/lebensmitteleinzelhande> (02.04.2024).
- Bopst, J.; Herbener, R.; Hölzer-Schopohl, O.; Lindmaier, J.; Myck, T.; Weiß, J. (2019): Umweltschonender Luftverkehr - lokal - national - international. TEXTE 130/2019 Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-06_texte-130-2019_umweltschonender_luftverkehr_0.pdf (11.10.2023).
- 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.
- Bundesregierung (2022): Verbrennermotoren ab 2035 nur im Betrieb CO2-frei | Bundesregierung. In: *Die Bundesregierung informiert | Startseite*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/europa/verbrennermotoren-2058450>. (06.12.2022).
- Bundesverband Paket und Expresslogistik e.V. (2023): BIEK-Vorsitzender Marten Bosselmann zur Gewichtsbegrenzung von Paketen. Berlin. <https://www.biek.de/presse/meldung/statement-gewichtsbegrenzung-pakete.html> (02.04.2024).

- Cames, M.; Graichen, J.; Kasten, P.; Kühne, S.; Faber, J.; Nelissen, D.; Shanthi, H.; Scheelhaase, J.; Grimme, W.; Maertens, S. (2021): Klimaschutz im Luft- und Seeverkehr: Roadmaps zur Erreichung des Klimaziels - Strategiepapier Luftfahrt. Öko-Institut, CE Delft, DLR im Auftrag des Umweltbundesamts.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/rlsv_policy_paper_aviation_de.pdf (11.10.2023).
- Daganzo, C. F. (1984): The Distance Traveled to Visit N Points with a Maximum of C Stops per Vehicle: An Analytic Model and an Application. In: *Transportation Science*. Vol. 18, No. 4, S. 331–350. DOI: 10.1287/trsc.18.4.331.
- De Jonge, M. M. J.; Gallego-Zamorano, J.; Huijbregts, M. A. J.; Schipper, A. M.; Benítez-López, A. (2022): The impacts of linear infrastructure on terrestrial vertebrate populations: A trait-based approach. In: *Global Change Biology*. Vol. 28, No. 24, S. 7217–7233. DOI: 10.1111/gcb.16450.
- DESTATIS (2008): NST-2007: Einheitliches Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik - 2007. Wiesbaden.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Tabellen/nsz-2007.pdf?__blob=publicationFile (17.10.2023).
- DESTATIS (2020): Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2019. Fachserie 8, Reihe 6.1
https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DEHeft_mods_00126359 (02.04.2024).
- Destatis (2021): Aufkommen an Haushaltsabfällen: Deutschland, Jahre, Abfallarten; Tabelle 32121-0001.
- DESTATIS (2021): Warenverzeichnis für die Außenhandelsstatistik.
https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/Aussenhandel/Downloads/WA2022-3200300-22700-4.pdf?__blob=publicationFile (17.10.2023).
- Destatis (2022): Verkehrsunfälle: Unfälle von Güterkraftfahrzeugen im Straßenverkehr 2020. Berlin.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/unfaelle-gueterkraftfahrzeuge-5462410207004.pdf?__blob=publicationFile (02.04.2024).
- DESTATIS (2023a): Außenhandel (Spezialhandel).
www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Konjunkturindikatoren/Lange-Reihen/Aussenhandel/lrahl01a.html. (18.10.2023).
- DESTATIS (2023b): Statistik 51000 (Außenhandel). In: *genesis-online*.
- DESTATIS (2023c): Statistik 46331 (Seeverkehrsstatistik). In: *genesis-online*.
- DESTATIS (2023d): Ergebnisse zur Statistik der Flächennutzung. Kennzahlen, Tabellen, Publikationen, Grafiken und weitere Informationen zum Thema Statistik der Flächennutzung. In: *Statistisches Bundesamt*.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/_inhalt.html. (19.10.2023).
- Destatis (2023a): Daten aus dem Gemeindeverzeichnis, Regionalstatistische Raumtypologie (RegioStaR 17), nach Fläche, Bevölkerung und Bevölkerungsdichte. Gebietsstand: 31.12.2022.
- Destatis (2023b): Statistische Bericht Abfallbilanz 2021. Wiesbaden.
- Dittrich, M.; Vogt, R.; Fehrenbach, H.; Dünnebeil, F.; Gerhardt, N.; Schörr, K.; Biemann, K.; Ewers, B.; Limberger, S.; Auberger, A.; Köppen, S.; Liebich, A. (2019): Ressourcenschonendes und treibhausgasneutrales Deutschland.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_06-2020_endbericht_vergleich_szenarien.pdf (16.04.2024).
- 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).

EAFO (2024): Vehicles and fleet: Germany. <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/germany/vehicles-and-fleet> (15.03.2024).

EEA (2023): A. National emission inventories (CLRTAP). Submission 2023 for Germany. In: *EIONET. Central Data Repository*.

https://cdr.eionet.europa.eu/de/un/clrtap/inventories/envy_yl5a/DE_2023_Annex_I_2019.xlsx/manage_document. (30.10.2023).

Eidhammer, O.; Johansen, B. G.; Andersen, J. (2016): Comparing Deliveries to On-street Consignees and Consignees Located at Shopping Centers. In: *Transportation Research Procedia*. Vol. 14, S. 1221–1229. DOI: [10.1016/j.trpro.2016.05.193](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.193).

Eisenbahnbundesamt (2022): Lärmmonitoring Jahresbericht 2022 - Schallmessung im Schienenverkehr. In: *Lärmmonitoring Jahresbericht 2022 - Schallmessung im Schienenverkehr*. <https://www.laerm-monitoring.de/pdf/L%C3%A4rm-Monitoring%20Jahresbericht%202022.pdf>. (30.10.2023).

EU (2019): 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): Commission proposes rules for cleaner air and water. In: *European Commission - European Commission. Text*, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6278. (08.08.2023).

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).

Eurostat (2023a): Food waste and food waste prevention by NACE Rev. 2 activity - tonnes of fresh mass. https://doi.org/10.2908/ENV_WASFW (02.04.2024).

Eurostat (2023b): Datensatz Road "freight transport by region of unloading (t, tkm, journeys) - annual data [road_go_ta_ru]". <https://data.europa.eu/data/datasets/qyhzzquypiczutyte3oia?locale=en> (02.04.2024).

Faber, J.; Hanayama, S.; Zhang, S.; Pereda, P.; Hauerhof, E.; Schim van der Loeff, W.; Smith, T.; Zhang, Y.; Kosaka, H.; Adachi, M.; Bonello, J.-M.; Galbraith, C.; Gong, Z.; Hirata, K.; Hummels, D.; Kleijn, A.; Lee, D. S.; Liu, Y.; Lucchesi, A.; Mao, X.; Muraoka, E.; Osipova, L.; Qian, H.; Rutherford, D.; Suárez de la Fuente, S.; Yuan, H.; Velandia Perico, C.; Wu, L.; Sun, D.; Yoo, D.-H.; Xing, H. (2021): Fourth IMO GHG Study 2020. Internationale Seeschiffahrts-Organisation, London.

<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf> (17.10.2023).

Fehrenbach, H.; Busch, M.; Bürck, S.; Bischoff, M.; Theis, S.; Reinhardt, J.; Blömer, J. (2021a): Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen. Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen für Ökobilanzen – Teilbericht III: DATEN –. Umweltbundesamt.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_170-2021_flaechenrucksaecke_von_guetern_und_dienstleistungen_teilbericht_iii.pdf (04.04.2024).

Fehrenbach, H.; Busch, M.; Bürck, S.; Bischoff, M.; Theis, S.; Reinhardt, J.; Blömer, J. (2021b): Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen. Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen für Ökobilanzen – Teilbericht I: METHODEN –. Umweltbundesamt.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_169-2021_flaechenrucksaecke_von_guetern_und_dienstleistungen_teilbericht_ii.pdf (03.04.2024).

Frankfurt UAS (2017): Bericht zum Forschungsvorhaben „Analyse und Empfehlungen für Belieferungsstrategien der KEP-Branche im innerstädtischen Bereich“. Fachbereich 1: Architektur \ Bauingenieurwesen \ Geomatik, Frankfurt. https://www.frankfurt-university.de/fileadmin/standard/Hochschule/Fachbereich_1/FFin/Neue_Mobilitaet/Veroeffentlichungen/2017/20171103_Nachtrag_Bericht_final_Druck.pdf (02.04.2024).

Fraport (2020): Frankfurt Airport Luftverkehrsstatistik 2019. www.fraport.com/content/dam/fraport-company/documents/investoren/finanz--und-verkehrszahlen/luftverkehrsstatistik/luftverkehrsstatistik_2019.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/luftverkehrsstatistik_2019.pdf (19.10.2023).

Gawlak, C. (2019): Unzerschnittene verkehrsarme Räume (UZVR) > 100 km² in Deutschland. Bundesamt für Naturschutz. https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/planung/eingriffsregelung/Dokumente/artikel_uzvr_2015.pdf (19.06.2023).

Giegrich, J.; Sturm, K. (1999): Teilbericht Naturraumbeanspruchung waldbaulicher Aktivitäten als Wirkungskategorie für Ökobilanzen im Rahmen des Forschungsvorhabens Ökologische Bilanzierung graphischer Papiere F + E-Vorhaben Nr. 103 50 120. https://www.researchgate.net/publication/322887434_Teilbericht_Naturraumbeanspruchung_waldbaulicher_Aktivitaeten_als_Wirkungskategorie_fur_Okobilanzen_im_Rahmen_des_Forschungsvorhabens_Okologische_Bilanzierung_graphischer_Papiere_F_E-Vorhaben_Nr_103_50 (27.10.2023).

Gil, J.; Sánchez-Díaz, I. (2017): Exploring the relationship between urban form and freight trip generation: 30th August 2017 - RGS-IBG Annual International Conference - London, UK.

Giulio, M. D.; Holderegger, R.; Nobis, M.; Righetti, A.; Senn, J.; Stofer, S. (2010): Verkehr und Verkehrsinfrastruktur. In: *Der Wandel der Biodiversität in der Schweiz seit 1900: Ist die Talsohle erreicht?*. Bristol-Schriftenreihe Haupt, Bern.

Gruchmann, T.; Demtschenko, R.; Salzmann, A. (2022): Assistenzsysteme im Güterverkehr – eine Perspektive zur Fachkräftesicherung? In: M. KLUMPP: / T. HANKE: / M. TEN HOMPEL: / B. NOCHE: *Ergonomie in der Intralogistik*. FOM-Edition Springer Gabler, Wiesbaden. S. 177–199.

Hanisch, T.; Ullrich, A.; Hecht, M.; Wunderli, J.-M.; Jäggi, J. (2023): Lärminderungspotenzial bei Güterzuglokomotiven. ZEVrail 147 (2023) 9 September.

Heidt, C.; Helms, H.; Kräck, J.; Münch, F.; Hausberger, S.; Weller, K.; Diegmann, V.; Wursthorn, H.; Latt, C. (2023): Fortentwicklung der Verordnung (EU) Nr. 2016/1628 für Mobile Maschinen und Geräte - NRMM (Non Road Mobile Machinery). ifeu, TU Graz, IVU im Auftrag des Umweltbundesamtes. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023-04-13_texte_53-2023_fortentwicklung-vo-mobile-maschinen-geraete-nrmm.pdf (15.04.2024).

Ibraheem Adeniran; Jan Blechschmidt; Elija Deineko; Luise Fremder; Anton Galich; Greta Hettich; Stephan Kirsten; Gernot Liedtke; Jan Reher; Carina Thaller; Christian Winkler; Peter Vortisch; Verena Zeidler; Christoph Heidt; Hinrich Helms; Jan Kräck (2023): Digitalisierung im Verkehr Potentiale und Risiken für Umwelt und Klima. ifeu im Auftrag des Umweltbundesamts. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/150_2023_texte_digitalisierung_im_verkehr_0.pdf (05.05.2024).

ifeu (2023): Transport Emission Model (TREMOM), Version 6.43. Heidelberg.

Intraplan/Trimode (2023): Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2021-2022. Stand vom 01.03.2023. Im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV). https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/prognose-berichtgleitende-langfrist-verkehrsprognose.pdf?__blob=publicationFile (17.10.2023).

ISO 14083 (2023): Greenhouse gases — Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations.

ITOPF (2020): Oil Tanker Spill Statistics 2019.

www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/Company_Lit/Oil_Spill_Stats_brochure_2020_for_web.pdf (21.02.2024).

IVE (2023): EcoTransIT World. www.ecotransit.org.

Jaeger, J. A. G. (2002): Landschaftszerschneidung: eine transdisziplinäre Studie gemäss dem Konzept der Umweltgefährdung. Ulmer, Stuttgart, Hohenheim.

Jaeger, J. A. G.; Bowman, J.; Brennan, J.; Fahrig, L.; Bert, D.; Bouchard, J.; Charbonneau, N.; Frank, K.; Gruber, B.; Von Toschanowitz, K. T. (2005): Predicting when animal populations are at risk from roads: an interactive model of road avoidance behavior. In: *Ecological Modelling*. Vol. 185, No. 2–4, S. 329–348. DOI: [10.1016/j.ecolmodel.2004.12.015](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.12.015).

Jaeger, J. A. G.; Holderegger, R. (2005): Schwellenwerte der Landschaftszerschneidung. Vol. 14, No. 2.

Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Räder, D.; Köllermeier, N.; Waßmuth, V. (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030. ifeu und PTV. Gefördert durch das BMUV. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2022-02-04_-_My_eRoads_-_Potentiale_Lkw-Antriebstechnologien_-_final_01.pdf (04.04.2024).

Juergen Bertling; Hamann, L.; Bertling, R. (2018): Kunststoffe in der Umwelt. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Fraunhofer UMSICHT. DOI: [10.24406/uMsiCht-n-497117](https://doi.org/10.24406/uMsiCht-n-497117).

KBA (2022): Fahrzeugzulassungen (FZ): Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten). Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg. https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz25_b_uebersicht.html (22.09.2023).

KBA, K.-B. (2023): Fahrzeugbestand zum 01. Januar 2023. Flensburg.

Kille, C. (2010): Güteraufkommen nach Branchen: Köln, zugleich Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg 2010 unter dem Titel „Branchenspezifische Quantifizierung der Güteraufkommen in Deutschland“. Eul, Lohmar and Köln.

Kleiser, K. J. (2010): Kategorisierung und Bewertung von Geschäftsmodellen in der Luftfracht. Arbeitspapiere Güterverkehr und Logistik N. 002 Karlsruhe. DOI: [10.5445/IR/1000016289](https://doi.org/10.5445/IR/1000016289) <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000016289> (19.10.2023).

Knörr, W.; Schacht, A.; Gores, S. (2012): Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Energieeinsätze und Emissionen des zivilen Flugverkehrs - TREMOD AV. Texte 48/2012 ifeu und Öko-Institut im Auftrag des Umweltbundesamts, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-eines-modells-zur-berechnung> (19.10.2023).

Koellner, T.; De Baan, L.; Beck, T.; Brandão, M.; Civit, B.; Margni, M.; I Canals, L. M.; Saad, R.; De Souza, D. M.; Müller-Wenk, R. (2013): UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 18, No. 6, S. 1188–1202. DOI: [10.1007/s11367-013-0579-z](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0579-z).

Kreis Melanie; Appel, Frank (2019): Strategie 2025: Deutsche Post DHL Group. Frankfurt. <https://group.dhl.com/content/dam/deutschepostdhl/de/media-center/media-relations/documents/2019/presentation-ceo-cfo-strategie-2025.pdf> (02.04.2024).

Leerkamp, Bert; Thiemermann, Andre; Schlott, Marian; Holthaus, Tim; Aichinger, Wolfgang; Wittenbrink, Paul (2020): Lieferrn ohne Lasten: Wie Kommunen und Logistikwirtschaft den städtischen Güterverkehr zukunftsfähig gestalten können. Berlin. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/Staedtischer-Gueterverkehr/Agora-Verkehrswende_Lieferrn-ohne-Lasten_1-1.pdf (02.04.2024).

Lohre, Dirk; Stock, Wilfried; Huster, Frank (2021): Stückgutlogistik in Deutschland: Studie zu Prozessen, Marktvolumen, Herausforderungen und Zukunftsentwicklungen eines logistischen Spezialsegments. Berlin. https://www.dslv.org/fileadmin/Redaktion/PDFs/07_Publikationen/DSLV_Studie_Stueckgutlogistik_2021-08-24.pdf (02.04.2024).

Lorentz, H.; Schmidt, W.; Hellebrandt, P.; Ketzler, M.; Jakobs, H.; Janicke, U. (2021): Einfluss eines Großflughafens auf zeitliche und räumliche Verteilungen der Außenluftkonzentrationen von Ultrafeinstaub < 100 nm, um die potentielle Belastung in der Nähe zu beschreiben - unter Einbeziehung weiterer Luftschadstoffe. Im Auftrag des Umweltbundesamts. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/einfluss-eines-grossflughafens-auf-zeitliche> (27.10.2023).

Madadi, H.; Moradi, H.; Soffianian, A.; Salmanmahiny, A.; Senn, J.; Geneletti, D. (2017): Degradation of natural habitats by roads: Comparing land-take and noise effect zone. In: *Environmental Impact Assessment Review*. Vol. 65, S. 147–155. DOI: [10.1016/j.eiar.2017.05.003](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.05.003).

Makait, M.; Fiedler, R.; Kleist, L.; Pistol, B.; Sorgenfrei, J. (2014): Seeverkehrsprognose 2030. MWP - IHS - UNICONSULT - Fraunhofer CML.

Meiller Fahrzeug- und Maschinenfabrik - GmbH & Co KG (2024): MEILLER Absetzkipper TECTRIS: Behälter und Container effizienter transportieren. <https://www.meiller.com/de/produkte/absetzkipper/> (02.04.2024).

Milà i Canals, L.; Bauer, C.; Depestele, J.; Dubreuil, A.; Freiermuth, R.; Gaillard, G.; Michelsen, O.; Müller-Wenk, R.; Rydgren, B. (2006): Key elements in a framework for land use impact assessment within LCA. https://www.researchgate.net/profile/Jochen-Depestele/publication/257828604_Key_Elements_in_a_Framework_for_Land_Use_Impact_Assessment_Within_LCA_11_pp/links/0deec53469d91218ca000000/Key-Elements-in-a-Framework-for-Land-Use-Impact-Assessment-Within-LCA-11-pp.pdf (29.07.2022).

NOW (2019): Marktanalyse urbane Wirtschaftsverkehre in Deutschland. Berlin. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/now_marktanalyse-urbaner-wirtschaftsverkehr-1.pdf (03.04.2024).

Öko-Institut (2020): Factsheet 1: Klimaschädliche Wirkungen des Luftverkehrs. https://fliegen-und-klima.de/downloads/Factsheet_1_klimaschaedliche_Wirkungen.pdf (11.10.2023).

Opitz, M.; Rosentritt, S.; Schwemmer, M.; Köhler, A.; Allekotte, M.; Dünnebeil, F.; Jöhrens, J.; Kämper, C.; Brauer, C.; Köhler, J.; Bernsmann, A.; Kirsch, D. (noch unveröffentlicht): Umwelt- und Klimaschutz in der Logistik - Potenzail umweltorientierter Logistikkonzepte zur Reduzierung der Emissionen des Güterverkehrs (PULK). Fraunhofer IIS, ifeu, Fraunhofer ISI und Fraunhofer IML im Auftrag des Umweltbundesamts.

PALFINGER AG (2024): Modellübersicht Abrollkipper & Absetzkipper: Palfinger Modelle. <https://www.palfinger.com/de/produkte/abrollkipper-absetzkipper/modelle> (03.04.2024).

Peadar, J. M.; Tuberville, T. D.; Buhlmann, K. A.; Nafus, M. G.; Todd, B. D. (2015): Delimiting road-effect zones for threatened species: implications for mitigation fencing. In: *Wildlife Research*. Vol. 42, No. 8, S. 650. DOI: [10.1071/WR15082](https://doi.org/10.1071/WR15082).

Reck, H.; Hänel, K. (2010): Bundesweite Prioritäten zur Wiedervernetzung von Ökosystemen: Überwindung straßenbedingter Barrieren. Kurzfassung. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.

Reck, H.; Hänel, K.; Jeßberger, J.; Lorenzen, D. (2008): UZVR (Unzerschnittene verkehrersarme Räume), UFR (Unzerschnittene Funktionsräume) + biologische Vielfalt: Landschafts- und Zerschneidungsanalysen als

Grundlage für die räumliche Umweltplanung. Naturschutz und Biologische Vielfalt Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.

Reichel, J. (2023): E.ON-Studie: Elektrische Paketfahrzeuge könnten CO₂-Ausstoß massiv senken. Huss Verlag, München. <https://vision-mobility.de/news/e-on-studie-elektrische-paketfahrzeuge-koennten-co2-ausstoss-massiv-senken-295348.html> (03.04.2024).

Repenning, J.; Harthan, R. O.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Ludig, S.; Matthes, F. C.; Mendelevitch, 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).

Rosenkranz, S.; Krauß, M.; Kielhorn, U.; Lücking, W. (2001): HINTERGRUNDPAPIER Binnenschifffahrt. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) e.V., 10179 Berlin.

Schäfer, J. G. (2020): Merkmale der Luftfracht. In: *Luftfracht*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. S. 39–52. DOI: [10.1007/978-3-658-15192-8_2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-15192-8_2).

Schäfer, P. K.; Stolte, D.; Schocke, K.-O. (2020): Handlungsleitfaden Wirtschaftsverkehr. Frankfurt. https://www.frankfurt-university.de/fileadmin/standard/Hochschule/Fachbereich_1/FFin/Neue_Mobilitaet/Veroeffentlichungen/2020/Handlungsleitfaden_Wirtschaftsverkehr.pdf (04.04.2024).

Schmaus, M.; Bawidamann, J.; Friedrich, M.; Haberl, M.; Trenkwalder, L.; Fellendorf, M.; Uhlig, J.; Lohse, R.; Pestel, E. (2023): Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung. Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_14-2023_fluessiger_verkehr_fuer_klimaschutz_und_luftreinhaltung.pdf (03.04.2024).

Schwarz-von Raumer, H.-G. (2021): Ökologische Folgen. In: D. VALLÉE: / B. ENGEL: / W. VOGT: *Stadtverkehrsplanung Band 2*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. S. 221–250. DOI: [10.1007/978-3-662-59695-1_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-59695-1_7).

Semlitsch, R. D.; Ryan, T. J.; Hamed, K.; Chatfield, M.; Drehman, B.; Pekarek, N.; Spath, M.; Watland, A. (2007): Salamander Abundance along Road Edges and within Abandoned Logging Roads in Appalachian Forests. In: *Conservation Biology*. Vol. 21, No. 1, S. 159–167. DOI: [10.1111/j.1523-1739.2006.00571.x](https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00571.x).

Spielmann, M.; Bauer, C.; Dones, R.; Tuchschnid, M. (2007): Transport Services. Data v2.0. Ecoinvent Report No. 14. Villingen and Uster.

Stadt Wiesbaden (2020): Mikrosimulation Lieferzonen Auswirkung NO_x-Reduktion. <https://www.wiesbaden.de/leben-in-wiesbaden/verkehr/stadtlogistik/stufenkonzept-stadtlogistik.php> (08.05.2024).

Statista (2023): Prognose der Umsätze für Online Food Delivery in Deutschland für die Jahre 2021 bis 2028 (in Millionen Euro). <https://de.statista.com/prognosen/642308/online-food-delivery-umsatz-in-deutschland> (15.03.2024).

Statistisches Bundesamt (2022): Auswertung „Bruttoinlandsprodukt/Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen - Jahressumme - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte“ der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung des Statistischen Bundesamtes. <https://www.statistikportal.de/de/vgrdl/ergebnisse-kreisebene/bruttoinlandsprodukt-bruttowertschoepfung-kreise> (02.04.2024).

Statistisches Bundesamt (2023): Verkehr in Zahlen 2022/2023.

- Steven, H. (2005): Ermittlung der Geräuschemission von Kfz im Straßenverkehr. RWTÜV Fahrzeug GmbH, Würselen. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2952.pdf> (30.10.2023).
- Tripp, C. (2019): Distributions- und Handelslogistik. Netzwerke und Strategien der Omnichannel-Distribution im Handel. Wiesbaden.
- UBA (2020): Neuer Schwefelgrenzwert für Seeschiffskraftstoffe. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/neuer-schwefelgrenzwert-fuer-seeschiffskraftstoffe>. (27.10.2023).
- UBA (2021a): Indikator: Landschaftszerschneidung. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-landschaftszerschneidung#die-wichtigsten-fakten> (25.07.2023).
- UBA (2021b): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2021 - Nationaler Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2019. Climate Change 43/2021 Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-6>.
- UBA (2022a): Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. In: *Umweltbundesamt. Text*, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>. (25.05.2022).
- UBA (2022b): Umweltbewusstsein in Deutschland 2020 - Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/ubs_2020_0.pdf (27.10.2023).
- UBA (2023a): Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. In: *Umweltbundesamt. Text*, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>. (30.11.2023).
- UBA (2023b): Luftqualität 2022. In: *Umweltbundesamt. Text*, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/galerie/luftqualitaet-2022>. (22.09.2023).
- UBA (2023c): Emissionen des Verkehrs. *Text*, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs>. (22.09.2023).
- UBA (2023d): Verpackungsabfälle. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/verpackungsabfaelle#verpackungen-uberall> (15.03.2024).
- UNEP; WMO (2011): Integrated assessment of black carbon and tropospheric ozone: summary for decision makers. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8028;jsessionid=9256A46FC44973A1D66525A9E6C8D7AD> (26.10.2023).
- Unfallkasse Hessen (2024): Schwerhörig von der Abfallsammlung? Muss nicht sein! Wie Abfallwirtschaftsbetriebe ihre Müllwerker vor Lärm schützen können. <https://www.ukh.de/unternehmen-und-beschaefigte/arbeitschutz-und-gesundheit/muellader-gegen-laerm-bei-der-schuetzung-schuetzen> (02.04.2024).
- Van Der Ree, R.; Jaeger, J. A. G.; Van Der Grift, E. A.; Clevenger, A. P. (2011): Effects of Roads and Traffic on Wildlife Populations and Landscape Function: Road Ecology is Moving toward Larger Scales. In: *Ecology and Society*. Vol. 16, No. 1, S. art48. DOI: 10.5751/ES-03982-160148.
- Verband kommunaler Unternehmen e.V. (2019): Unfallgeschehen: Auswertung der Umfrageergebnisse 2018 in der Abfallwirtschaft und Straßenreinigung. Information VKU Verlag GmbH, Berlin.
- Verband kommunaler Unternehmen e.V. (2022): Betriebsdaten 2020: VKU-Umfrage zur Abfallsammellogistik bei kommunalen Entsorgungsunternehmen. Berlin.

Wilhelm Schwarzmüller GmbH (2024): Kipp Fahrzeuge: Kategorie: Kipp Fahrzeuge.
<https://www.schwarzmueller.com/de/fahrzeuge/kipp-fahrzeuge> (02.04.2024).

Zentralverband des Deutschen Handwerks e. V. (2023): Handwerkszählung 2021 nach Gewerken, Beschäftigungsgrößen, Umsatzgrößen, Bundesländern und Rechtsformen. Zentralverband des Deutschen Handwerks e. V., Berlin. <https://www.zdh.de/ueber-uns/fachbereich-wirtschaft-energie-umwelt/statistik/handwerkszaehlung/handwerkszaehlung-2021/> (02.04.2024).