

TEXTE

156/2020

Ökologische Bewertung von Verkehrsarten

Abschlussbericht

TEXTE 156/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3716581060

FB000202

Ökologische Bewertung von Verkehrsarten

Abschlussbericht

von

Michel Allekotte, Fabian Bergk, Kirsten Biemann, Carolin
Deregowski, Wolfram Knörr
ifeu, Heidelberg

Hans-Jörg-Althaus, Daniel Sutter
INFRAS, Zürich

Thomas Bergmann
Öko-Institut, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

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

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

Durchführung der Studie:

ifeu Heidelberg
Im Weiher 10
69121 Heidelberg

Abschlussdatum:

November 2019

Redaktion:

Fachgebiet I 2.1 Umwelt und Verkehr
Martin Lambrecht

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, August 2020

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

Kurzbeschreibung: Ökologische Bewertung von Verkehrsarten

In der umweltpolitischen Diskussion sind ökologische Verkehrsartenvergleiche sehr gefragt und werden für unterschiedlichste Zwecke verwendet. Für viele Fragestellungen waren die vorliegenden Datengrundlagen und Bewertungsansätze nicht mehr ausreichend. Ziel dieser Studie war daher die Aktualisierung und Ergänzung der Datengrundlagen für die ökologische Bilanzierung des inländischen Personen- und Güterverkehrs einschließlich aller Lebenswegabschnitte (Nutzungsphase, Energie-, Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung) für wichtige Wirkungskategorien (THG- und Luftschadstoffemissionen, kumulierter Energieaufwand, kumulierter Rohstoffaufwand, Verkehrsflächen). Zusätzlich wurden Verkehrsunfälle sowie die Umweltkosten für die genannten Kategorien und zusätzlich für die Lärmwirkung ermittelt.

Die Bilanzierung der Umweltwirkungen erfolgte für verschiedene Betrachtungsebenen: Status quo- bzw. Durchschnittsbetrachtungen wurden ebenso berücksichtigt wie dynamische Effekte bei Veränderungen von Verkehren mit den Auswirkungen auf das Gesamtsystem. Im Rahmen des Projekts wird auch eine Methodik für die ökologische Bilanzierung in den verschiedenen Betrachtungsebenen entwickelt und in verschiedenen Betrachtungsfällen angewendet.

Abstract: Ecological assessment of different types of transport

There is great demand for ecological comparisons of different types of transport in the environmental policy debate and these comparisons are used for a wide range of purposes. However, both the available input data and methodology for analysis are no longer sufficient for many current questions. The aim of this study was therefore to update and expand existing data for the ecological assessment of domestic passenger and freight transport. This update included all life cycle stages (use phase as well as energy, vehicle and infrastructure supply) for key impact categories (GHG emissions, air pollution, cumulative energy demand, cumulative raw material demand, traffic areas). In addition to these classic impact indicators, noise pollution, traffic accidents and external costs were also included in the transport type comparison.

The analysis of environmental impacts explored a number of different scenarios and included status quo or average observations as well as dynamic effects of changes in transport with the resulting implications for the overall system. During the project, a methodology for ecological assessments at the various levels of interest was developed and applied for a number of different scenarios.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis	12
Abkürzungsverzeichnis.....	16
Zusammenfassung.....	18
Summary	29
1 Zielstellung	39
1.1 Ausgangslage.....	39
1.2 Ziele	39
1.3 Vorgehen.....	40
2 Vergleichsgrundlagen.....	41
2.1 Stand der Forschung	41
2.1.1 Methoden für Verkehrsmittelvergleiche	41
2.1.2 Wichtige Grundlagen für den Verkehrsartenvergleich.....	42
2.2 Grundlagen der Bilanzierung im Verkehrsartenvergleich.....	46
2.2.1 Sichtweise	46
2.2.2 Vorgehensweise.....	47
2.2.3 Betrachtungsebenen.....	47
2.2.4 Systemgrenzen.....	49
2.2.5 Bezugsgröße.....	51
2.2.6 Multifunktionalität und Allokationsprinzipien.....	51
2.3 Lebenswegabschnitte	54
2.3.1 Nutzungsphase.....	54
2.3.2 Energetische Vorketten	55
2.3.3 Fahrzeugherstellung, -wartung und -entsorgung.....	56
2.3.4 Infrastrukturbereitstellung, -betrieb, -unterhalt und -entsorgung	57
2.4 Wirkungskategorien.....	60
2.4.1 Kumulierter Energieaufwand (KEA)	61
2.4.2 Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)	61
2.4.3 Treibhausgasemissionen.....	62
2.4.4 Luftschadstoffemissionen.....	63
2.4.5 Flächenbedarf	65
2.4.6 Verkehrsunfälle.....	68
2.4.7 Lärm	71

2.5	Umwelt- und Unfallkosten	71
2.5.1	Übersicht.....	71
2.5.2	Vorgehen: Wirkungskategorien und Datengrundlagen.....	72
2.5.3	Vertiefung Lärmkosten	74
3	Methoden der ökologischen Bilanzierung	82
3.1	Eigenschaften der Verkehrsarten	82
3.1.1	Grundsätzliche Eigenschaften der Verkehrsarten	82
3.1.2	Eigenschaften der Verkehrsarten im Personenverkehr.....	85
3.1.3	Eigenschaften der Verkehrsarten im Güterverkehr.....	93
3.2	Potenzialbetrachtung.....	97
3.3	Betrachtung der typischen Nutzung (Status quo).....	98
3.4	Systemische Betrachtung.....	98
3.4.1	Grundlagen der systemischen Betrachtung.....	98
3.4.2	Betrachtung von systemischen Änderungen im Hintergrundsystem	99
3.4.2.1	Auswirkungen auf die energetischen Vorketten	99
3.4.2.2	Auswirkungen auf die Fahrzeugbereitstellung	100
3.4.2.3	Auswirkungen auf die Infrastrukturbereitstellung	101
3.5	Vorgehen bei systemischen Betrachtungen	101
3.5.1	Untersuchungsrahmen und Zielsetzung	102
3.5.2	Datengrundlage und -beschaffung	106
3.5.3	Methode und Berechnung.....	108
3.5.3.1	Mobilitätskenngrößen	109
3.5.3.2	Fahrzeugkenngrößen	110
3.5.3.3	Berechnung der Umweltwirkungen.....	113
3.5.4	Auswertung und Diskussion.....	114
4	Ökologische Bilanzierung der Verkehrsarten.....	116
4.1	Potenzialbetrachtung.....	116
4.1.1	Potenziale der Verkehrsmittel bei voller Auslastung.....	116
4.1.2	Antriebsvergleich bei Personenkraftwagen.....	117
4.2	Betrachtung der typischen Nutzung (Status quo).....	121
4.2.1	Treibhausgasemissionen und Luftschadstoffe.....	121
4.2.1.1	Personenverkehr.....	121
4.2.1.2	Güterverkehr	128
4.2.2	Kumulierter Energie- und Rohstoffaufwand.....	130

4.2.2.1	Personenverkehr.....	131
4.2.2.2	Güterverkehr	133
4.2.3	Flächenbedarf	136
4.2.4	Unfälle.....	146
4.2.5	Umweltkosten.....	149
4.3	Systemische Bilanzierung.....	159
4.3.1	Lastenradeinsatz im innerstädtischen Verteilverkehr	160
4.3.1.1	Untersuchungsrahmen und Zielsetzung	160
4.3.1.2	Datengrundlage und -beschaffung	162
4.3.1.3	Methode und Berechnung.....	164
4.3.1.4	Auswertung und Diskussion.....	168
4.3.2	Ausbau von Radschnellwegen	169
4.3.2.1	Untersuchungsrahmen und Zielsetzung	169
4.3.2.2	Datengrundlage und -beschaffung	170
4.3.2.3	Methode und Berechnung.....	172
4.3.2.4	Auswertung und Diskussion.....	175
4.3.3	Verlagerung vom Flugverkehr auf den Zug durch Bahnschnellfahrstrecken.....	176
4.3.3.1	Untersuchungsrahmen und Zielsetzung	176
4.3.3.2	Datengrundlage und -beschaffung	177
4.3.3.3	Methode und Berechnung.....	180
4.3.3.4	Auswertung und Diskussion.....	183
4.3.4	Liberalisierung des Fernlinienbusmarkts	184
4.3.4.1	Untersuchungsrahmen und Zielsetzung	184
4.3.4.2	Datengrundlage und -beschaffung	185
4.3.4.3	Methode und Berechnung.....	187
4.3.4.4	Diskussion und Fazit.....	189
4.3.5	Einführung von stationslosen E-Tretroller-Leihsystemen.....	190
4.3.5.1	Untersuchungsrahmen und Zielsetzung	190
4.3.5.2	Datengrundlage und -beschaffung	191
4.3.5.3	Methode und Berechnung.....	193
4.3.5.4	Auswertung und Diskussion.....	199
4.3.6	Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein	200
4.3.6.1	Untersuchungsrahmen und Zielsetzung	200
4.3.6.2	Datengrundlage und -beschaffung	200

4.3.6.3	Methode und Berechnung.....	202
4.3.6.4	Auswertung und Diskussion.....	205
	Quellenverzeichnis	207
A	Anhang: Datengrundlagen	213
A.1	Verkehrsmengengerüst Deutschland 2017	213
A.2	Ergebnisse für den Fahrzeugbetrieb (TTW)	214
A.3	Ergebnisse der Energiebereitstellung (WTT)	215
A.4	Ergebnisse für Fahrzeugherstellung, -wartung und -entsorgung	216
A.5	Datengrundlagen und Ergebnisse für Infrastrukturbereitstellung, -betrieb, -unterhalt und -entsorgung.....	217
A.6	Datengrundlagen und Ergebnisse kumulierter Rohstoffaufwand	221
A.7	Datengrundlagen und Ergebnisse Flächenverbrauch	226
A.8	Detailergebnisse Umweltkosten	236

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Klimawirkung des Personenverkehrs in Deutschland 2017	20
Abbildung 2:	Umweltkosten des Personenverkehrs in Deutschland 2017.....	23
Abbildung 3:	Ablaufschema einer systemischen Bilanzierung	26
Abbildung 4:	Schematisches Vorgehen zur Monetarisierung der Umwelt- und Unfallkosten	74
Abbildung 5:	Schematisches Vorgehen Schätzung durchschnittliche Lärmkosten: Hauptmethode	76
Abbildung 6:	Ablaufschema einer systemischen Bilanzierung	102
Abbildung 7:	Klimawirkung des Personenfernverkehrs in Deutschland 2017 – Vergleich durchschnittliche und volle Auslastung.....	117
Abbildung 8:	Treibhausgasemissionen eines Kompaktklasse Pkw über den Lebensweg in Abhängigkeit der Lebensfahrleistung bei durchschnittlicher Nutzung	118
Abbildung 9:	Treibhausgasemissionen eines mittleren Pkw im Antriebsvergleich (Status quo- Betrachtung mit deutschem Strommix 2017 – EE-Anteil 36 %)	120
Abbildung 10:	Klimawirkung des Personennahverkehrs in Deutschland 2017	122
Abbildung 11:	Klimawirkung des Personenfernverkehrs in Deutschland 2017	123
Abbildung 12:	NO _x -Emissionen im Personennahverkehr in Deutschland 2017	124
Abbildung 13:	NO _x -Emissionen im Personenfernverkehr in Deutschland 2017	125
Abbildung 14:	PM ₁₀ -Emissionen im Personennahverkehr in Deutschland 2017	126
Abbildung 15:	PM ₁₀ -Emissionen im Personenfernverkehr in Deutschland 2017	127
Abbildung 16:	Klimawirkung im Güterverkehr in Deutschland 2017	128
Abbildung 17:	NO _x -Emissionen im Güterverkehr in Deutschland 2017	129
Abbildung 18:	PM ₁₀ -Emissionen im Güterverkehr in Deutschland 2017	130
Abbildung 19:	Kumulierter Energieaufwand im Personenverkehr in Deutschland 2017	131
Abbildung 20:	Kumulierter Rohstoffaufwand (metallisch) im Personenverkehr in Deutschland 2017	132
Abbildung 21:	Kumulierter Rohstoffaufwand (mineralisch) im Personenverkehr in Deutschland 2017	133
Abbildung 22:	Kumulierter Energieaufwand im Güterverkehr in Deutschland 2017	134
Abbildung 23:	Kumulierter Rohstoffaufwand (metallisch) im Güterverkehr in Deutschland 2017	135

Abbildung 24:	Kumulierter Rohstoffaufwand (mineralisch) im Güterverkehr in Deutschland 2017.....	136
Abbildung 25:	Durchschnittliche Flächenbelegung im Personenverkehr in Deutschland 2017, Variante A (Allokation nach temporärer Flächenbelegung und Fahrleistung)	137
Abbildung 26:	Durchschnittliche Flächenbelegung im Personenverkehr in Deutschland 2017, Variante B (Allokation nach Standfläche und Fahrleistung).....	138
Abbildung 27:	Durchschnittliche Flächenbelegung im Personennahverkehr in Deutschland 2017, Variante A (Allokation nach temporärer Flächenbelegung und Fahrleistung)	139
Abbildung 28:	Durchschnittliche Flächenbelegung im Personennahverkehr in Deutschland 2017, Variante B (Allokation nach Standfläche und Fahrleistung).....	140
Abbildung 29:	Durchschnittliche Flächenbelegung im Personenfernverkehr in Deutschland 2017, Variante A (Allokation nach temporärer Flächenbelegung und Fahrleistung)	141
Abbildung 30:	Durchschnittliche Flächenbelegung im Personenfernverkehr in Deutschland 2017, Variante B (Allokation nach Standfläche und Fahrleistung).....	142
Abbildung 31:	Durchschnittliche Flächenbelegung im Güterverkehr in Deutschland 2017, Variante A (Allokation nach temporärer Flächenbelegung und Fahrleistung)	143
Abbildung 32:	Durchschnittliche Flächenbelegung im Güterverkehr in Deutschland 2017, Variante B (Allokation nach Standfläche und Fahrleistung).....	144
Abbildung 33:	Durchschnittliche Flächenbelegung im Güterverkehr in Deutschland 2017, ohne Grünflächen/Böschungen und Flüsse Variante A (Allokation nach temporärer Flächenbelegung und Fahrleistung).....	145
Abbildung 34:	Durchschnittliche Flächenbelegung im Güterverkehr in Deutschland 2017, ohne Grünflächen/Böschungen und Flüsse Variante B (Allokation nach Fahrleistung).....	146
Abbildung 35:	Unfälle im Personenfernverkehr in Deutschland 2017	147
Abbildung 36:	Unfälle im Personennahverkehr in Deutschland 2017.....	148
Abbildung 37:	Unfälle im Güterverkehr in Deutschland 2017.....	149
Abbildung 38:	Umweltkosten des Personennahverkehrs in Deutschland 2017.....	150
Abbildung 39:	Umweltkosten des Personenfernverkehrs in Deutschland 2017.....	151
Abbildung 40:	Umweltkosten des Güterverkehrs in Deutschland 2017.....	152
Abbildung 41:	Umweltkosten des Güterverkehrs in Deutschland 2017 (Darstellung ohne Luftverkehr)	153

Abbildung 42:	Durchschnittliche Lärmkosten je Fzkm gemäß Hauptmethode	155
Abbildung 43:	Durchschnittliche Lärmkosten je Fzkm: Vergleich mit anderen Studien.....	157
Abbildung 44:	Gegenüberstellung der Zustellungskonzepte mittels LNF und Lastenrad	161
Abbildung 45:	THG-Emissionen des Ausgangszustands und der drei Fälle – „Lastenradeinsatz im innerstädtischen Verteilverkehr“	168
Abbildung 46:	Jährliche THG-Minderungen der vier Regionen – „Ausbau von Radschnellwegen“	174
Abbildung 47:	Modale Aufteilung zwischen Bahn und Flugzeug in Abhängigkeit der Reisedauer	179
Abbildung 48:	Modale Anteile der Bahn an Bahn + Flugzeug vor und nach der Reisezeitverkürzung	181
Abbildung 49:	Jährliche Klimawirkung der Fälle gegenüber dem Ausgangszustand	183
Abbildung 50:	Abwanderung zum Fernlinienbus – „Womit sind Kunden bisher gereist?“	185
Abbildung 51:	Zusätzliche THG-Emissionen durch den Fernlinienbus und vermiedene Emissionen durch Verlagerung	189
Abbildung 52:	Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse E-Tretroller in Berlin	195
Abbildung 53:	Bandbreite der Klimawirkung von E-Tretrollern in Berlin	198
Abbildung 54:	Jährlichen THG-Emissionen für WTW, Fahrzeug und Infrastruktur – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“	205

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Betrachtete Verkehre im Verkehrsartenvergleich	18
Tabelle 2:	Übersicht über die behandelten Betrachtungsfälle mitsamt der jeweiligen Fragestellung.....	26
Tabelle 3:	Übersicht über wichtige Grundlagen für den ökologischen Verkehrsartenvergleich	43
Tabelle 4:	Betrachtete Verkehre im Verkehrsartenvergleich	49
Tabelle 5:	Betrachtungsräume und zugehörige Distanzklassen des Verkehrsartenvergleichs.....	50
Tabelle 6:	Typische Verkehrsarten je Betrachtungsraum im Verkehrsartenvergleich	50
Tabelle 7:	Umweltwirkungen der energetischen Vorketten (Knörr et al., 2016).....	55
Tabelle 8:	Überblick über die Wirkungskategorien.....	60
Tabelle 9:	Treibhausgaspotenzial (GWP 100) nach IPCC	62
Tabelle 10:	Betrachtete Luftschadstoffemissionen	65

Tabelle 11:	Kategorien für Landbesetzung und Landtransformation (Definitionen ecoinvent).....	66
Tabelle 12:	Übersicht zur Monetarisierung der Effekte (Kosten) der einzelnen Wirkungskategorien.....	73
Tabelle 13:	Anzahl stark lärmbelästigter Personen (Highly Annoyed, HA) pro 1 Mio. Fzkm/Jahr.....	76
Tabelle 14:	Allokationsfaktoren für die Aufteilung der gesamten Lärmkosten auf die verschiedenen Fahrzeugkategorien (relativ zu Pkw: Faktor 1,0)	80
Tabelle 15:	Fahrleistungen in Deutschland (2016) nach räuml. Situationen, in Mio. Fzkm/Jahr	81
Tabelle 16:	Wichtige Eigenschaften der Verkehrsmittel im Verkehrsartenvergleich	82
Tabelle 17:	Kennzahlen der Verkehrsmittel im Personenverkehr	91
Tabelle 18:	Kennzahlen der Verkehrsmittel im Güterverkehr	96
Tabelle 19:	Fahrzeugeigenschaften der Pkw im Antriebsvergleich (Status quo).....	119
Tabelle 20:	Unfallkosten Personenverkehr in Deutschland (2017), in €-ct pro Pkm bzw. tkm.....	154
Tabelle 21:	Durchschnittliche Lärmkosten je Fzkm gemäß Hauptmethode	155
Tabelle 22:	Durchschnittliche Lärmkosten je Fzkm gemäß Alternativmethode	156
Tabelle 23:	Betrachtungsfälle und ihre Eigenschaften	159
Tabelle 24:	Kennwerte für die Paketzustellung per LNF im Ausgangszustand	163
Tabelle 25:	Kennwerte für die Paketzustellung per Lastenradkonzept	163
Tabelle 26:	Emissionsfaktoren innerorts – „Lastenradeinsatz im innerstädtischen Verteilverkehr“	164
Tabelle 27:	Mögliche Verlagerungen im KEP-Bereich durch den Lastenradeinsatz.....	165
Tabelle 28:	Spezifische Fahrleistungen und benötigte Fahrzeuge – „Lastenradeinsatz im innerstädtischen Verteilverkehr“	166
Tabelle 29:	Absolute Fahrleistungen in den Fällen – „Lastenradeinsatz im innerstädtischen Verteilverkehr“	166
Tabelle 30:	THG- und innerstädtische NO _x -Emissionen in den Fällen – „Lastenradeinsatz im innerstädtischen Verteilverkehr“	167
Tabelle 31:	Verlagerungspotenzial auf das Fahrrad durch Errichtung von Radschnellwegen in vier Regionen.....	171
Tabelle 32:	Fahrleistungsspezifische Treibhausgasemissionen von Fahrrädern, Pedelecs und Pkw (innerorts).....	171
Tabelle 33:	Zusätzlich zu versiegelnde Fläche durch Errichtung von Radschnellwegen in vier Regionen.....	172

Tabelle 34:	Änderung der Verkehrsleistung gegenüber dem Ausgangszustand durch die Errichtung von Radschnellwegen.....	172
Tabelle 35:	Änderung der jährlichen Fahrleistung gegenüber dem Ausgangszustand durch die Errichtung von Radschnellwegen.....	173
Tabelle 36:	Zusätzlich THG-Emissionen durch die Errichtung der Radschnellwege.....	173
Tabelle 37:	Änderung der jährlichen THG-Emissionen für WTW, Fahrzeug und Infrastruktur	174
Tabelle 38:	Änderung der städtischen TTW-NO _x -Emissionen – „Ausbau von Radschnellwegen“	175
Tabelle 39:	Fluggastzahlen, -distanzen und Reisedauer der zwanzig wichtigsten Flugrelationen in Deutschland.....	177
Tabelle 40:	Fahrdistanzen der Bahn auf den ausgewählten zwanzig Relationen.....	178
Tabelle 41:	Reisedauer der Bahn bei der Nutzung von ICE-Sprinter-Verbindungen und bei Nutzung von Verbindungen ohne ICE-Sprinter	180
Tabelle 42:	Spezifische Klimawirkungen in CO _{2eq} nach IPCC 2013 und Auslastung für die Bahn und das Flugzeug.....	180
Tabelle 43:	Änderung der Fahrzeugkenngößen bei der Verlagerung Flugzeug auf Bahn	182
Tabelle 44:	THG-Emissionen - Ausgangszustand und veränderte Zustände	182
Tabelle 45:	Anteile der Verkehrsmittel am Vor-/Nachlauf	186
Tabelle 46:	Fahrzeugkenngößen – „Fernlinienbus“	186
Tabelle 47:	Fahrzeugkenngößen des Vor-/Nachlaufs – „Fernlinienbus“	186
Tabelle 48:	„Verlagerte“ Verkehrsmengen auf den Fernlinienbus	187
Tabelle 49:	THG-Emissionen des Vor-/Nachlauf für WTW, Fahrzeug und Infrastruktur	188
Tabelle 50:	Änderungen der Klimawirkungen des Hauptlaufs – Fall 1	188
Tabelle 51:	Änderungen der THG-Emissionen des Hauptlaufs – Fall 2	188
Tabelle 52:	Fahrzeugkenngößen für E-Tretroller.....	191
Tabelle 53:	THG-, direkte NO _x - und direkte PM _{2,5} -Emissionsfaktoren der weiteren Verkehrsmittel (innerorts)	192
Tabelle 54:	Angaben zu Verlagerungen durch E-Tretroller.....	193
Tabelle 55:	Betrachtete Fälle in der Lebenszyklusanalyse (Angabe für Berlin)	194
Tabelle 56:	Emissionsfaktoren von E-Tretroller (in Berlin)	195
Tabelle 57:	Zentrale Annahmen Fallunterscheidung E-Tretroller.....	196
Tabelle 58:	Klimawirkungen E-Tretroller in Berlin	198
Tabelle 59:	Luftschadstoffe E-Tretroller in Berlin	198

Tabelle 60:	Mobilitätskenngrößen – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“	201
Tabelle 61:	Fahrzeugkenngrößen – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“	201
Tabelle 62:	THG-Emissionsfaktoren – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“	202
Tabelle 63:	Schieneninfrastruktur – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“	202
Tabelle 64:	Relevante Größen in den Fällen – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“	203
Tabelle 65:	Vor-/Nachlauf in den Fällen – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“	203
Tabelle 66:	THG-Emissionen in den Fällen – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“	204
Tabelle 67:	Verkehrsmengengerüst Deutschland 2017 (Personenverkehr)	213
Tabelle 68:	Verkehrsmengengerüst Deutschland 2017 (Güterverkehr) ...	213
Tabelle 69:	Energie- und Emissionsfaktoren Fahrzeugbetrieb (TTW, Personenverkehr)	214
Tabelle 70:	Energie- und Emissionsfaktoren Fahrzeugbetrieb (TTW, Güterverkehr)	214
Tabelle 71:	Energie- und Emissionsfaktoren Energiebereitstellung (WTT, Personenverkehr)	215
Tabelle 72:	Energie- und Emissionsfaktoren Energiebereitstellung (WTT, Güterverkehr)	215
Tabelle 73:	Energie- und Emissionsfaktoren der Fahrzeuge (Personenverkehr)	216
Tabelle 74:	Energie- und Emissionsfaktoren der Fahrzeuge (Güterverkehr)	217
Tabelle 75:	Energie- und Emissionsfaktoren der Fahrzeuge (sonstige)	217
Tabelle 76:	Energie- und Emissionsfaktoren der Infrastruktur (Personenverkehr)	218
Tabelle 77:	Energie- und Emissionsfaktoren der Infrastruktur (Güterverkehr)	218
Tabelle 78:	Energie- und Emissionsfaktoren der Infrastruktur (sonstige)	219
Tabelle 79:	Allokationsfaktoren der Infrastruktur im Straßenverkehr nach PCU (80 % Gewichtung)	219
Tabelle 80:	Allokationsfaktoren der Infrastruktur im Straßenverkehr nach AASHO (20 % Gewichtung)	219
Tabelle 81:	Allokationsfaktoren der Infrastruktur im Schienenverkehr nach Btkm	220
Tabelle 82:	Allokationsfaktoren der Infrastruktur im Luftverkehr nach Verkehrseinheiten	220

Tabelle 83:	KRA-Ergebnisse der Fahrzeuge (Personenverkehr).....	221
Tabelle 84:	KRA-Ergebnisse der Fahrzeuge (Güterverkehr).....	221
Tabelle 85:	KRA-Ergebnisse der Fahrzeuge (sonstige)	222
Tabelle 86:	Übersicht über die verwendeten KRA Faktoren (mit Quellenangaben)	222
Tabelle 87:	Verkehrsfläche und Allokationsfaktoren (temporäre Flächenbelegung)	226
Tabelle 88:	Verkehrsfläche und Allokationsfaktoren (Standfläche der Fahrzeuge und Fahrleistung)	229
Tabelle 89:	Flächennutzung: Allokation temporäre Flächenbelegung und Fahrleistung	232
Tabelle 90:	Flächennutzung: Allokation Standfläche der Fahrzeuge und Fahrleistung	234
Tabelle 91:	Detailergebnisse zu den Umweltkosten 2017 (Personenverkehr), in €-ct/Pkm	236
Tabelle 92:	Detailergebnisse zu den Umweltkosten 2017 (Güterverkehr), in €-ct/tkm	237
Tabelle 93:	Detailergebnisse zu den Umweltkosten 2017 (sonstige), in €- ct/Fzkm	237

Abkürzungsverzeichnis

API	Application programming interface (Programmierschnittstelle)
BS	Binnenschiff
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CO_{2eq}	CO ₂ -Äquivalent
eKFV	Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung
EWf	Emission weighting factor
FLBus	Fernlinienbus
FV	Fernverkehr
Fzkm	Fahrzeugkilometer
GPS	Global positioning system (Globales Positionsbestimmungssystem)
GWP	Global warming potential (Treibhausgaspotenzial)
ICE	Inter-City-Express (Zuggattung im Schienenpersonenfernverkehr)
Kap.-tkm	Kapazitäts-Tonnenkilometer
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KEP	Kurier-Express-Paket
KKR	Kleinkraftrad, Moped
KR	Kraftrad

KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
Lbus	Linienbus (Nahverkehr)
LGVI	Güterluftverkehr international
LGVN	Güterluftverkehr national
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug $\leq 3,5$ t zulässiges Gesamtgewicht
LNVP	Landesweiter Nahverkehrsplan
LPVI	Personenluftverkehr international
LPVN	Personenluftverkehr national
MiT	Mobilität in Tabellen
MIV	Motorisierter Individualverkehr (Pkw und Krafträder)
NL	Nachlauf
NO_x	Stickoxide
NV	Nahverkehr
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖSPV	Öffentlicher Straßenpersonennahverkehr (Linienbusse im Nah- und Regionalverkehr, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen)
ÖV	Öffentlicher Verkehr
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
Platzkm	Platzkilometer
PM₁₀	Partikelemissionen kleiner 10 μm (enthält auch PM _{2.5})
PM_{2.5}	Partikelemissionen kleiner 2,5 μm
RBus	Reisebus
SGV	Schienengüterverkehr
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge (Lkw, Last-/Sattelzug)
SO₂	Schwefeldioxid
SPFV	Schienenpersonenfernverkehr (Eisenbahn)
SPNV	Schienenpersonennahverkehr (Eisenbahn)
SSU	Straßen-, Stadt- und U-Bahn
THG	Treibhausgase
tkm	Tonnenkilometer
TREMOD	Transport Emission Model
TREMOD-AV	TREMOD-Aviation (Flugverkehr)
TREMOD-NA	TREMOD-Navigation (Binnenschifffahrt)
TTW	Tank-to-Wheel
VL	Vorlauf
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheel

Zusammenfassung

In der umweltpolitischen Diskussion sind ökologische Verkehrsartenvergleiche sehr gefragt und werden für unterschiedlichste Zwecke verwendet. Aktuelle Umweltvergleiche oder -bilanzen bauen in der Regel auf Status quo-Betrachtungen auf, beispielsweise die vom Umweltbundesamt jährlich veröffentlichten Energieverbrauchs- und Emissionskennzahlen der Verkehrsmittel des Personen- und Güterverkehrs in Deutschland im aktuellen Bezugsjahr. Für viele Fragestellungen sind die vorliegenden Datengrundlagen und Bewertungsansätze jedoch nicht ausreichend. Ziel dieser Studie war daher die Aktualisierung und Ergänzung wichtiger Kennzahlen und Vorgehensweisen für ökologische Verkehrsartenbilanzierungen und -vergleiche.

Daher wurde im Verkehrsartenvergleich der gesamte Lebensweg der Fahrzeuge von der Herstellung über die Nutzung bis zu ihrer Entsorgung sowie die benötigte Verkehrsinfrastruktur betrachtet. Folgende **Lebenswegabschnitte** wurden dabei untersucht:

- ▶ Nutzungsphase (Fahrzeugbetrieb mit Energieverbrauch und Auspuffemissionen)
- ▶ Energiebereitstellung von Kraftstoffen und Strom
- ▶ Herstellung, Wartung und Entsorgung der Fahrzeuge
- ▶ Bau, Unterhalt und Betrieb der benötigten Verkehrsinfrastruktur

Alle relevanten Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasser und Luft) sowie die zugehörigen Verkehrsmittel wurden ausgewertet. Dabei wurden der inländische Personen- und Güterverkehr sowie der internationale Flugverkehr bis zur ersten Landung im Ausland betrachtet.

Tabelle 1: Betrachtete Verkehre im Verkehrsartenvergleich

Oberbegriff	Inhalt
Verkehrsträger	Straße, Schiene, Wasser, Luft
Transportart	Personenverkehr, Güterverkehr
Verkehrsart	Fußverkehr, Radverkehr, MIV, Car Sharing, ÖPV-Straße, ÖPV-Schiene, unterteilt in Schienenpersonennahverkehr (SPNV) und Schienenpersonenfernverkehr (SPFV), Fernlinienbusverkehr, Reisebusverkehr, Straßengüterverkehr, Eisenbahngüterverkehr, Binnenschifffahrt (Güter), Flugverkehr (Güter und Personen)
Verkehrsmittel	Zu Fuß, Fahrrad, Pedelec, Pkw, Kraftrad (KR), Kleinkraftrad (KKR), Linienbus im Nah- und Regionalverkehr, Linienbus im Fernverkehr, Reisebus, Straßen-, Stadt- und U-Bahn (SSU), Fernverkehrszug, Nahverkehrszug, Lastenrad, leichte Nutzfahrzeuge (LNF), Lkw, Last-/Sattelzug, Güterzug, Binnengüterschiff, Flugzeug

Der Verkehr in Deutschland ist für verschiedene Umweltwirkungen verantwortlich, von denen die wichtigsten im Verkehrsartenvergleich untersucht wurden. Folgende **Wirkungskategorien** wurden dafür ausgewertet:

- ▶ Treibhausgasemissionen

- ▶ Luftschadstoffe: Stickoxide (NO_x), Feinstaub ($\text{PM}_{2,5}$ sowie PM_{10}) sowie Kohlenmonoxid, Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe und Schwefeldioxid
- ▶ Ressourcenverbrauch anhand des kumulierten Energieaufwands (KEA), des kumulierten Rohstoffaufwands (KRA) sowie der Flächenbelegung

Neben diesen klassischen Wirkungsindikatoren wurden im Verkehrsartenvergleich zusätzlich auch die Lärmemissionen sowie Verkehrsunfälle und externe Kosten betrachtet.

Zunächst wurden mittlere Kennzahlen für alle in dieser Studie berücksichtigten Verkehrsarten, Wirkungskategorien und Lebenswegabschnitte ermittelt. Unterschieden wurde nach Personennah- und Fernverkehr sowie Güterverkehr. Alle Kennzahlen wurden bezogen auf die Verkehrsleistung in Personenkilometer oder Tonnenkilometer. Basis war die mittlere Fahrzeugflotte bei durchschnittlicher Auslastung und Betriebsweise in Deutschland 2017.

Treibhausgasemissionen

Die Reduktion der Klimawirkung des Verkehrs ist eine der drängendsten Aufgaben, die in den kommenden Jahren intensiv vorangetrieben werden soll. Wichtige Indikatoren sind die Kohlendioxidemission durch die Verbrennung fossiler Energieträger und weitere treibhausgasrelevante Gase wie Methan und Lachgas. Beim Flugverkehr ist eine zusätzliche Klimawirkung durch den Ausstoß von Partikeln, Schwefel- und Stickoxiden, Wasserdampf und anderen Emissionen in großen Flughöhen nachgewiesen. Diese Wirkung wurde als Emission Weighting Factor (EWF) ebenfalls berücksichtigt.

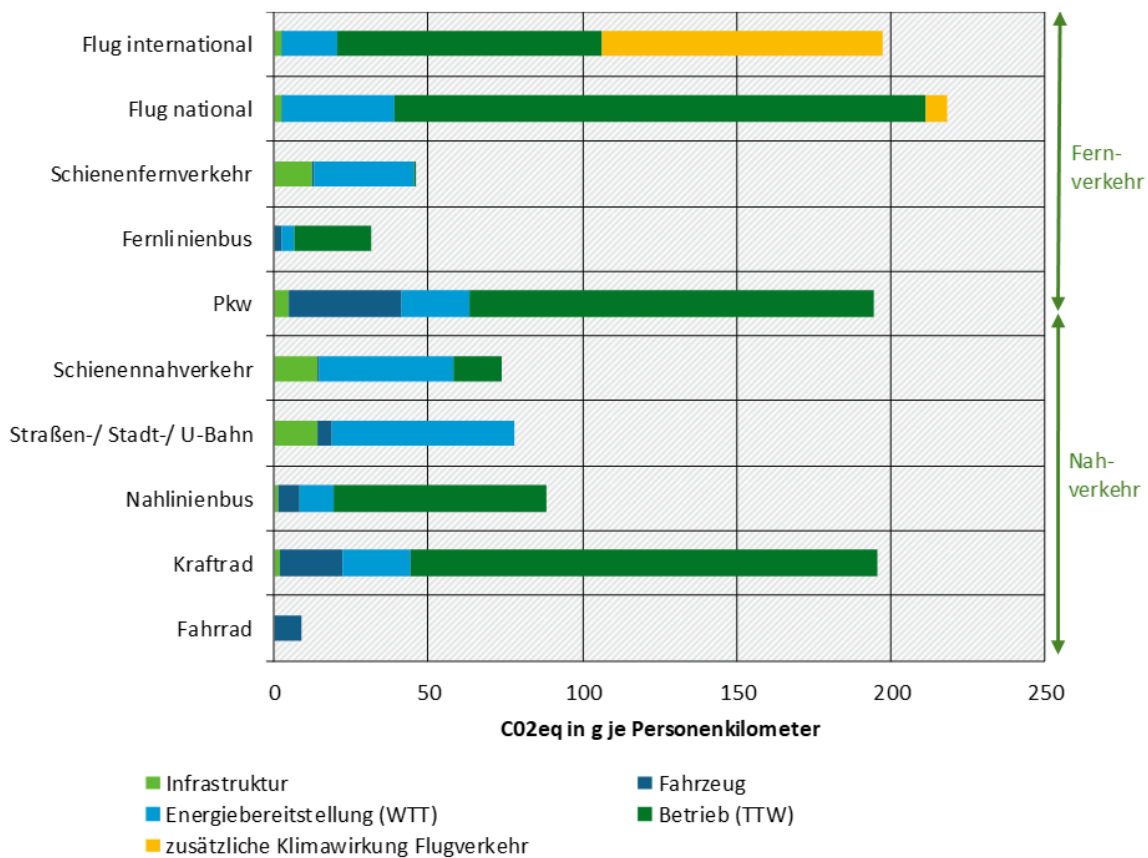
In dieser Studie werden die Treibhausgase und der EWF zusammengefasst und als „Klimawirkung“ bezeichnet. Die Einheit der Klimawirkung ist CO_2 -Äquivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$). Die wichtigsten Ergebnisse für die mittlere Klimawirkung der Verkehrsarten sind wie folgt:

- ▶ Beim Personenverkehr schneiden die Bus- und Schienenverkehre bezogen auf einen Personenkilometer am besten ab. Dabei ist der Fernverkehr besser als der Nahverkehr. Das relativiert sich bei der Bilanzierung von Gesamtemissionen allerdings dadurch, dass zurückgelegte Strecken im Fernverkehr deutlich länger sind als im Nahverkehr.
- ▶ Die Verkehrsmittel des motorisierten Individualverkehrs (Pkw und Krafträder) haben im Mittel zwei- bis über fünfmal höhere spezifische Emissionen je Personenkilometer als Busse und Bahnen.
- ▶ Am höchsten ist die Klimawirkung des Flugverkehrs, bei dem mit wachsender Reisedistanz die zusätzliche Klimawirkung in großen Flughöhen einen zunehmenden Anteil hat. Bei Flugreisen ergeben sich somit durch die Verknüpfung der hohen spezifischen Emissionen mit den langen Reisedistanzen hohe Gesamt-Klimawirkungen je Reise.

Ein Blick auf die einzelnen Lebenswegabschnitte ergibt folgendes Bild:

- ▶ Die Treibhausgasemissionen sind bei den motorisierten Verkehrsarten stark vom Fahrzeugbetrieb und der Energiebereitstellung dominiert, Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung haben zusammen einen deutlich kleineren Anteil. Grund ist die immer noch stark fossil dominierte Energie sowohl bei den Kraftstoffen als auch beim Strom.
- ▶ Die Emissionen durch die Fahrzeugbereitstellung sind im Straßenverkehr am höchsten, bei der Infrastrukturbereitstellung ist es der Schienenverkehr.

Abbildung 1: Klimawirkung des Personenverkehrs in Deutschland 2017



Quelle: eigene Berechnungen

Beim landgebundenen Güterverkehr ist die Klimawirkung des Straßenverkehrs bezogen auf die transportierten Tonnenkilometer am höchsten, deutlich geringere Klimawirkungen haben der Schienengüterverkehr und die Binnenschifffahrt. Beim Straßenverkehr ist die Fahrzeuggröße im Güterverkehr ein wesentlicher Faktor für die spezifischen Emissionen. Während die spezifischen Treibhausgasemissionen der großen Last- und Sattelzüge bei mittlerer Beladung um den Faktor drei höher sind als beim Schienenverkehr steigt der Wert bei kleineren Fahrzeugen auf den Faktor sieben bis 18 an. Besonders hoch ist die Klimawirkung des Flugverkehrs, die um den Faktor 45 bis 62 höher ist als der Schienenverkehr.

Luftschadstoffemissionen

Bei Luftschadstoffen steht in der Regel die lokale Wirkung im Vordergrund. Daher sind die direkten Auspuffemissionen anders zu bewerten als die Emissionen der Energie-, Fahrzeug und Infrastrukturbereitstellung, die überwiegend nicht in direkter Nachbarschaft von menschlichen Aufenthaltsräumen entstehen. In den vergangenen Jahren wurden die Auspuffemissionen durch die Abgasgesetzgebung stark reduziert. Dennoch gibt es noch Orte, an denen die geltenden Grenzwerte für die Luftbelastung, insbesondere für NO_2 und PM_{10} , nicht eingehalten werden. Meist trägt in diesen Bereichen der Straßenverkehr mit relevanten Mengen zur Luftbelastung bei.

Die in dieser Studie abgeleiteten Kennzahlen zeigen, dass die NO_x -Emissionen aus dem direkten Fahrzeugbetrieb bei Pkw, motorisierten Zweirädern, Bussen, Lkw, Binnenschiffen und Flugzeugen relevante Anteile haben, während bei den PM_{10} -Emissionen die Infrastruktur- und

Fahrzeuggestellung überwiegt. Trotzdem sind bei einzelnen Verkehrsmitteln die direkten PM₁₀-Emissionen noch deutlich höher als bei anderen, z. B. bei Zweitakt-Mopeds und Motorrädern. Auch der Flugverkehr weist relative hohe spezifische NO_x- und PM₁₀-Emissionen auf, die jedoch bezüglich ihrer Wirkung anders zu bewerten sind als diejenigen von Straßenfahrzeugen.

Da die Ergebnisse für die verschiedenen Luftschadstoffemissionen je Verkehrsart und Lebenswegabschnitt sehr unterschiedlich sind, sind pauschale Aussagen nicht hilfreich und eine detaillierte Betrachtung und Bewertung je nach Fragestellung notwendig.

Flächenbedarf

Der Bau von Verkehrsinfrastrukturen (Straßen, Schienen, Flughäfen, Kanäle etc.) geht üblicherweise einher mit der Umwandlung von natürlichen in künstliche Flächen. Die nachfolgende Nutzung der Infrastruktur verursacht eine Flächenbelegung und hindert die entsprechenden Flächen daran, in einen natürlichen Zustand zurückzukehren.

Da sich im Allgemeinen verschiedene Verkehrsmittel dieselbe Verkehrsinfrastruktur teilen, ist zur Bestimmung des Flächenbedarfs von Verkehrsarten meistens eine Allokation erforderlich. Um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass Allokationen immer auf subjektiven Wertvorstellungen basieren, werden in diesem Vorhaben zwei unterschiedliche Allokationsgrundlagen verwendet, die zu deutlich unterschiedlichen Resultaten führen. Variante A basiert auf der Flächenbelegung durch Einzelfahrzeuge während der Fahrt unter Berücksichtigung der Zeit, die das Fahrzeug benötigt, um einen Kilometer zurückzulegen sowie der jährlichen Fahrleistung, mit der diese Flächenzeit multipliziert wird. Variante B basiert auf dem Ansatz, dass die benötigte Verkehrsfläche einerseits mit der jährlichen Fahrleistung und andererseits mit der Fahrzeuggröße (Standfläche) zusammenhängt. Variante B wird in vielen Ökobilanzen, z. B. in der ecoinvent Datenbank, sowie als Grundlage zur Bestimmung der spezifischen externen Umweltkosten (€/m²) angewendet. Variante A wurde vom Umweltbundesamt vorgeschlagen, ist aber in der Ökobilanzierung nicht üblich und nicht kompatibel mit den spezifischen Umweltkosten aus NEEDS. Mit Ausnahme der Gemeindestraßen, deren Flächenbedarf zu 50 % bis 90 % auf Erschließungsfunktionen alloziert wird, sowie der Flughäfen, deren Flächenbedarf zu 7 % auf nicht-gewerbliche Flüge alloziert wird, werden Verkehrsflächen ausschliesslich der verkehrlichen Nutzung angerechnet.

In Variante A verantwortet der Schienennahverkehr mit Abstand am meisten Flächenbelegung pro Pkm. Er wird gefolgt von nationalen Flügen, Krafträdern, Mopeds, Pkw, Fahrrädern, Straßen-/Stadt-/U-Bahnen und Schienenfernverkehr. Die Nahlinienbusse, internationalen Flüge sowie Fern- und Reisebusse verursachen bei dieser Allokation die kleinsten Flächenbelegungen pro Pkm.

In Variante B weisen der Schienennahverkehr sowie der nationale Luftverkehr die höchsten spezifischen Flächenbelegungen (pro Pkm) im Personenverkehr auf. Darauf folgen Pkw, Schienenfernverkehr, Krafträder, Straßen-/Stadt-/U-Bahnen und Nahlinienbusse. Fern- und Reisebusse, Internationale Flüge, Fahrräder und Mopeds verantworten in Variante B am wenigsten Flächenbelegung pro Pkm.

Beim Güterverkehr zeigen beide Varianten ein ähnlicheres Bild. Nationale Flüge verursachen eine sehr hohe Flächenbelegung pro tkm. Bei den Binnenschifftransporten hängt die Flächenbelegung stark vom Fluss ab. Wegen der starken Nutzung des Rheins liegt die Flächenbelegung der Rheinschifftransporte nur wenig höher als diejenige des Schienengüterverkehrs. Kanäle weisen einen rund dreimal höheren Wert aus, während die anderen Flüsse etwa 20-mal höher liegen. Schwere Lkw und internationale Flüge verursachen am wenigsten Flächenbelegung pro tkm, Schienengüterverkehr knapp das doppelte von Lkw.

Umweltkosten

Verkehrsaktivitäten führen zu einer Reihe von volkswirtschaftlichen Kosten infolge negativer Umweltfolgen. Diese Kosten – oft als externe Kosten oder Umweltkosten bezeichnet – werden in der Regel nicht von den Verursachern getragen, sondern von der Allgemeinheit. Um bei einer ökologischen Bewertung von Verkehrsarten eine aggregierte Betrachtung für verschiedene Umweltwirkungen zu ermöglichen, stellen die Umweltkosten eine hilfreiche Größe dar, die zudem Aussagen zu den volkswirtschaftlichen Folgekosten des Verkehrs ermöglicht.

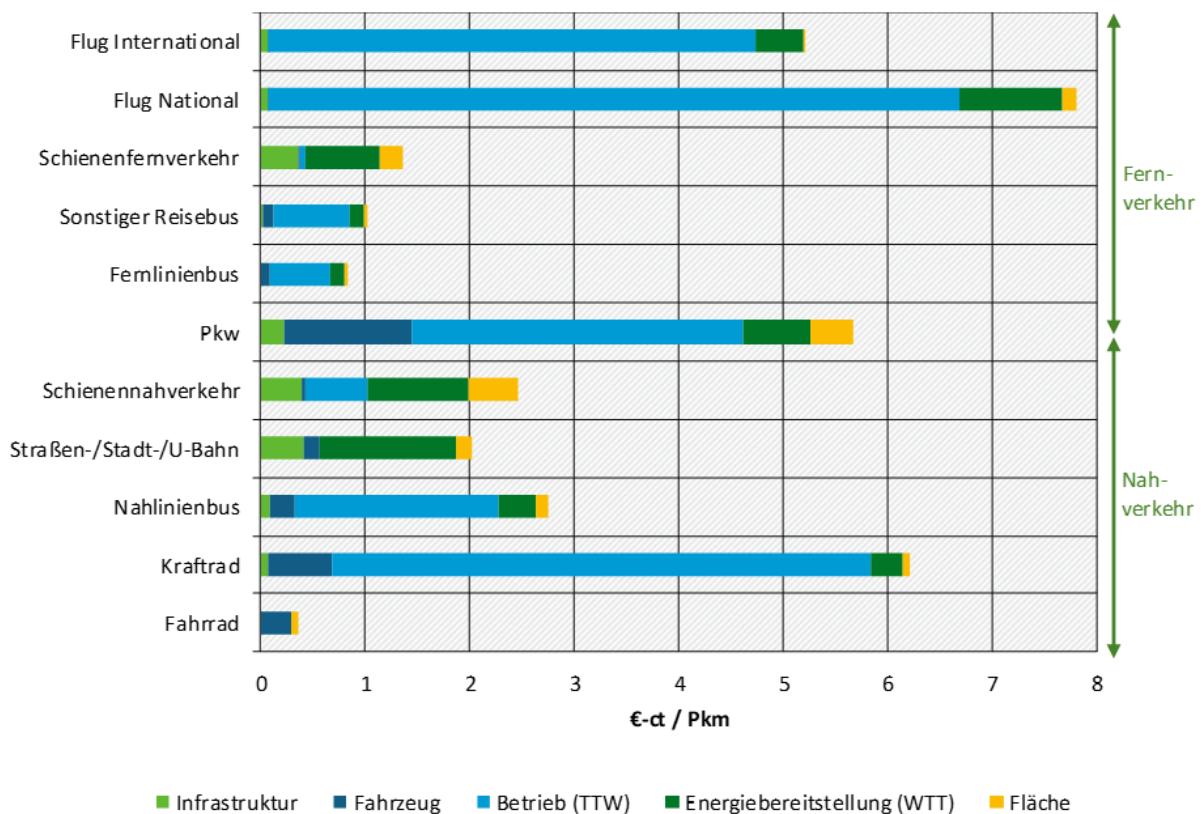
Im vorliegenden Projekt wurden die Umweltkosten für jene Wirkungskategorien berechnet, zu denen einerseits fundierte Umweltbelastungsdaten verfügbar sind (vgl. vorherige Abschnitte) und andererseits etablierte Ansätze zur Monetarisierung der Umweltwirkungen bestehen. Das Vorgehen zur Monetarisierung stützt sich zum größten Teil auf die Methodenkonvention 3.0 des UBA (Umweltbundesamt, 2019a). Die im Folgenden dargestellten Umweltkosten umfassen jeweils die Kosten infolge Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb (Tank-to-Wheel: TTW), der Energiebereitstellung (Well-to-Tank: WTT), sowie Herstellung und Unterhalt von Fahrzeugen und Infrastruktur. Zusätzlich enthalten sind die Umweltkosten infolge des Flächenverbrauchs, der zu Verlusten und Zerschneidung von natürlichen Habitaten bzw. Ökosystemen führt. Nicht abgedeckt sind die Lärmkosten, zu denen eine separate Vertiefung durchgeführt wurde (vgl. Kap. 2.5.3).

Die folgende Abbildung zeigt die Umweltkosten des Personenverkehrs in Deutschland, dargestellt in €-Cent pro Personenkilometer (€-ct/Pkm). Beim Vergleich der Zahlen ist es wichtig, den Fern- und Nahverkehr separat zu betrachten, weil die verschiedenen Verkehrsarten in der Regel nur innerhalb des Fern- bzw. Nahverkehrs substituierbar sind.

Im Personenfernverkehr werden die höchsten Umweltkosten im nationalen Flugverkehr verursacht (knapp 8 €-ct/Pkm), gefolgt vom Pkw und dem internationalen Flugverkehr, deren Umweltkosten zwischen 5 und 6 €-ct pro Personenkilometer betragen. Deutlich geringer sind die Umweltkosten des Schienenfernverkehrs (knapp 1,4 €-ct pro Pkm) sowie den Reise- und Fernlinienbussen (gut 0,8 bis 1 €-ct/Pkm).

Im Personennahverkehr weisen der Pkw sowie die motorisierten Zweiräder die höchsten Umweltkosten auf (rund 5-6 €-ct pro Pkm). Knapp halb so hoch sind die Umweltkosten im öffentlichen Nahverkehr: der städtische Schienenverkehr (Straßen-, Stadt- und U-Bahnen), der Schienennahverkehr und der Nahlinienbus verursachen Umweltkosten von 2 bis 2,75 €-ct/Pkm. Die geringsten Umweltkosten verursacht der nicht-motorisierte Fahrradverkehr, bei dem lediglich die Herstellung von Fahrzeug und Infrastruktur sowie der Flächenbedarf relevant sind.

Abbildung 2: Umweltkosten des Personenverkehrs in Deutschland 2017



Quelle: eigene Berechnungen

Im Güterverkehr weist der Luftverkehr die höchsten Umweltkosten auf (30 bis 60 €-ct pro tkm). Beim landgebundenen Verkehr sind die Umweltkosten beim Schienengüterverkehr mit rund 1 €-ct pro Tonnenkilometer und der Binnenschifffahrt mit rund 1,8 €-ct pro tkm am geringsten. Danach folgen schwere Lastwagen (Last-/Sattelzüge über 34t) mit Umweltkosten von rund 2,8 €-ct/tkm. Die Umweltkosten des Durchschnitts aller Lkw betragen 3,4 €-ct/tkm. Je kleiner die Fahrzeuge des Straßengüterverkehrs, desto höher die durchschnittlichen Umweltkosten je Tonnenkilometer. Im Güternahverkehr sind die Umweltkosten pro Kilometer folglich höher als im Güterfernverkehr.

Erweiterung der Ökologischen Bilanzierung von Verkehrssystemen

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen mittleren Kennzahlen sind typische Elemente einer Status quo-Betrachtung. Sie beschreibt den Zustand des Verkehrs an einem bestimmten Ort (hier Deutschland) innerhalb eines bestimmten Zeitraums (hier das Jahr 2017). Die Ergebnisse dieser Betrachtung ermöglichen eine Abschätzung, welche Verkehrsmittel bei den einzelnen Wirkungskategorien (NO_x, THG etc.) besser abschneiden als andere. So werden im Schnitt bei einer Bahnfahrt im Fernverkehr rund 46 g CO_{2eq} pro Personenkilometer emittiert (inkl. Fahrzeug und Infrastruktur). Damit schneidet die Bahn deutlich besser ab als der Pkw mit 194 g CO_{2eq}.

Jedoch kann anhand dieser Werte nicht die Aussage getroffen werden, dass bei der individuellen Entscheidung einer Person für eine Reise über 100 km statt des Zuges den Pkw zu nutzen 19,4 kg CO_{2eq} entstehen und bei der Bahn Emissionen von 4,6 kg CO_{2eq} vermieden werden. Die Differenz von 14,8 kg CO_{2eq} entspricht demnach nicht den vermiedenen THG-Emissionen, die aus der Verlagerung resultieren. Hierfür gibt es unterschiedliche Gründe. Zum einen können die

Kennzahlen eines Verkehrsmittels deutlich vom Durchschnitt abweichen und zum anderen werden weitere Randbedingungen durch die Status quo-Betrachtung nicht berücksichtigt, die bei Systemänderungen und der realen Nutzung von Bedeutung sind. Zudem werden lediglich die Umweltwirkungen pro zurückgelegte Strecke abgebildet, jedoch lässt dies keine Aussagen über die Umweltwirkungen des gesamten Weges zu.

Durch unterschiedliche systemische Effekte kommen also Abweichungen vom Status quo zustande. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über die Grenzen einer Status quo-Betrachtung:

- ▶ Der Auslastungsgrad beeinflusst erheblich die personenspezifischen Umweltwirkungen. Wenn nur eine Person in einem durchschnittlichen Pkw reist, so entstehen ca. 280 g CO_{2eq} pro Personenkilometer gegenüber 194 g CO_{2eq} (inkl. Fahrzeug und Infrastruktur) bei einer durchschnittlichen Auslastung. Der Wert für eine Person fällt höher aus, da die Umweltwirkungen der Fahrt auf weniger Personen verteilt werden.
- ▶ Verkehrsmittel haben je nach Nutzungsprofil unterschiedliche Umweltwirkungen. Wird ein Pkw wenig gefahren und vor allem im Nahverkehr (innerorts) eingesetzt, ergeben sich andere Emissionsfaktoren als bei einem Pkw der sehr viel auf der Autobahn unterwegs ist.
- ▶ Individuelle Entscheidungen beeinflussen unmittelbar nur die Nutzung des Individualverkehrs aber nicht das Angebot des öffentlichen Verkehrs. Kurzfristig ändert sich zunächst die Auslastung der öffentlichen Verkehrsmittel, bevor das Angebot angepasst wird.
- ▶ Mit den Durchschnittskennwerten werden keine Wegekettens abgebildet. Zwar sind die Umweltwirkungen pro Personenkilometer bei einer Bahnfahrt deutlich geringer als beim Pkw, jedoch werden häufig andere Verkehrsmittel verwendet, um vom Startpunkt zum Bahnhof bzw. vom Bahnhof zum Ziel zu gelangen. Diese Wege sind mit weiteren Umweltwirkungen verbunden.
- ▶ Zur Bestimmung der Umweltwirkungen eines Weges ist auch die Wegelänge relevant. Zwischen Start und Ziel können die zurückgelegten Distanzen voneinander abweichen. Da z. B. beim Linienbus auch Zwischenhalte angesteuert werden und sich diese in der Regel nicht direkt auf dem Weg vom Start zum Ziel befinden, wird oft eine längere Strecke zurückgelegt als bei der Fahrt mit dem Pkw.

Für die Bilanzierung solcher systemischen Effekten wurde in dieser Studie die folgende Methodik vorgeschlagen.

Vorgehen bei systemischen Betrachtungen

Umweltbilanzen, die verkehrliche Änderungen abbilden sollen, müssen alle relevanten aus den Änderungen resultierenden Umweltentlastungen und -belastungen berücksichtigen. Konkret ist bei einer systemischen Bilanzierung zu berücksichtigen

- ▶ zwischen welchen Verkehrsarten Verlagerungen auftreten und welchen Umfang diese haben,

- ▶ welche Änderungen bei den Wegekettten auftreten (geänderte Routen und damit geänderte Wegelängen, geänderte oder neue multimodale Wegekettten, z. B. die Vor- und Nachläufe für die Anfahrt zur Haltestelle)
- ▶ und ob Fahrten bei den betrachteten Verkehrsarten induziert werden oder wegfallen.

Es gibt eine große Vielfalt an möglichen Fragestellungen, die mit einer systemischen Bilanzierung quantifiziert und bewertet werden können. Wichtig ist daher eine transparente Darstellung der getroffenen Annahmen und des gewählten Vorgehens, sowie der resultierenden Unsicherheiten, um die Ergebnisse richtig einordnen zu können.

Betrachtet wird in der Regel der durch die Verlagerung ausgelöste Unterschied zwischen der Ausgangssituation und dem Zustand, der sich nach der Änderung einstellt. Zwar ist der Transformationsprozess auch von Relevanz, jedoch steht bei der Quantifizierung die Differenz zwischen dem Endzustand und dem Ausgangszustand im Fokus.

Die systemischen Bilanzen werden in dieser Studie anhand ausgewählter beispielhafter Fragestellungen, den sogenannten Betrachtungsfällen, erstellt und diskutiert. Für die systemische Bilanzierung wurde ein Vorgehen erarbeitet. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die einzelnen Schritte. Die dargestellten Schritte müssen nicht zwingend in der gezeigten Reihenfolge bearbeitet werden, da das Vorgehen iterativ erfolgt. So kann z. B. die Datenbeschaffung durchaus die Bilanzierung und die gesetzten Rahmenbedingungen beeinflussen.

Abbildung 3: Ablaufschema einer systemischen Bilanzierung



Die hier angeführte Vorgehensweise wurde für alle Betrachtungsfälle angewendet. Dabei zeigte sich, dass sich das Vorgehen zur Bilanzierung der Umweltwirkungen bei den Betrachtungsfällen aufgrund der anders gelagerten Fragestellungen, der Datenlage und der Komplexität unterscheiden.

Betrachtungsfälle

Insgesamt wurden ein Betrachtungsfall im Güterverkehr und fünf Betrachtungsfälle im Personenverkehr analysiert. Die Hälfte der Betrachtungsfälle untersuchte die Verlagerungspotenziale auf ökologisch günstigere Verkehrsmittel. Dabei wurde zunächst jeweils der Ausgangszustand erfasst. Im Anschluss wurden mögliche Verlagerungen untersucht und deren potenzielle Umweltauswirkungen ermittelt. Zwei Fälle hatten die Einführung eines neuen Verkehrsmittels als Untersuchungsgegenstand. Im letzten Betrachtungsfall wurden die Auswirkungen eines bereits erfolgten Ausbaus des Schienenpersonennahverkehrs untersucht.

Tabelle 2: Übersicht über die behandelten Betrachtungsfälle mitsamt der jeweiligen Fragestellung

Betrachtungsfall	Fragestellung
Lastenradeinsatz im innerstädtischen Verteilverkehr	Verlagerungspotenzial von Paketzustellungen auf Lastenradkonzepte im urbanen Raum

Betrachtungsfall	Fragestellung
Ausbau von Radschnellwegen	Verlagerungspotenzial vom Personennahverkehr auf das Fahrrad/ Pedelec durch den Neubau von Radschnellwegen
Verlagerung vom Flugverkehr auf den Zug durch Bahnschnellfahrstrecken	Verlagerungspotenzial von innerdeutschen Flügen auf die Bahn durch eine Reisezeitverkürzung im Bahnfernverkehr
Liberalisierung des Fernlinienbusmarkts	Mögliche reale Auswirkungen der Einführung von Fernlinienbussen
Einführung von stationslosen E-Tretroller-Leihsystemen	Mögliche reale Auswirkungen der Einführung von E-Tretrollerleihsystemen
Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein	Mögliche reale Auswirkungen des Ausbaus des SPNV in Schleswig-Holstein zwischen 2006 und 2016

Die wichtigsten Kernergebnisse der Betrachtungsfälle waren:

- ▶ Der **Lastenradeinsatz im innerstädtischen Verteilverkehr** hat das Potenzial zwischen 320 und 800 Millionen Paketzustellungen pro Jahr im urbanen Raum vom leichten Nutzfahrzeug zu verlagern. Bei einer Verlagerung von im Mittel 640 Millionen Paketen kann es dadurch, trotz des Einbezugs der benötigten Lkw-Fahrten zur Belieferung von innerstädtischen Mikrodepots, zu einer Treibhausgasminderung von 36.500 t CO_{2eq} pro Jahr kommen. Weitere positive Effekte sind durch eine Verringerung der innerstädtischen Schadstoffemissionen zu erwarten.
- ▶ Der **Neu- bzw. Ausbau von Radschnellwegen** in vier urbanen Regionen hat das Potenzial durch die Verlagerung von Fahrten vom motorisierten Individualverkehr auf das Fahrrad je nach Region zwischen 2.000 bis 9.500 t CO_{2eq} jährlich zu vermeiden. Auch Reduktionen der innerstädtischen NO_x-Emissionen sind zu erwarten.
- ▶ Eine **Reisezeitverkürzung im Bahnfernverkehr** zwischen den Städten mit dem höchsten Passagieraufkommen im Flugverkehr könnte jährlich bis zu 3,8 Mio. Passagiere erreichen. Kommt es durch den vermehrten Einsatz von ICE-Sprintern zu einer Reduktion des Angebotes im Flugverkehr und einer steigenden Auslastung im Bahnfernverkehr, kann diese Verlagerung bis zu 286.800 t CO_{2eq} pro Jahr einsparen. Bleiben die Flugverbindungen jedoch bestehen und es werden zusätzliche Züge eingesetzt, kann die Reisezeitverkürzung sogar zu Mehremissionen gegenüber dem Ausgangszustand führen. Dabei wurden Verlagerungen von anderen Verkehrsarten durch die Beschleunigung des Bahnverkehrs nicht untersucht.
- ▶ Die **Liberalisierung des Fernlinienbusmarktes in Deutschland** hat zunächst zu Mehremissionen durch die neuen Fernlinienbusse geführt. Etwa 10 % der Fahrgäste hätten ihre Reise ohne das neue Angebot nicht angetreten. Die meisten Fernlinienbusmitfahrer waren vorher mit dem Zug (44 %), dem Flugzeug (4 %) oder als Pkw-Mitfahrer (23 %) unterwegs. Lediglich 15 % der Fahrgäste sind vorher mit dem eigenen Pkw gefahren, diese Fahrten sind also durch das neue Angebot weggefallen. Durch die vermiedenen Pkw-Fahrten wurden jährlich insgesamt 48.400 t CO_{2eq} durch die Liberalisierung eingespart. Höhere

Treibhausgasminderungen könnten durch eine parallele Anpassung des Angebots im Schienen- und Flugverkehr erreicht werden.

- ▶ Ein **E-Tretroller** eines Leihrolleranbieters verursacht, je nach Rollerlebensdauer und Art der Aufladefahrten zwischen 71-400 g CO_{2eq} pro Personenkilometer. Damit hängt die Bewertung der E-Tretroller stark von ihrem Einsatzgebiet ab: Werden E-Tretroller vor allem als Zubringer zum öffentlichen Personenverkehr eingesetzt und dadurch Pkw-Fahrten vermieden, können diese zu einer Umweltentlastung führen. Dieser Effekt wird jedoch durch neu hinzugekommene E-Tretrollerfahrten (über)kompensiert mit denen Fußwege ersetzt wurden. Somit hat die Einführung der E-Tretroller in Berlin zu voraussichtlich zusätzlich 4.000 t CO_{2eq} pro Jahr geführt. Verbesserungen in der E-Tretroller Bilanz können vor allem durch kürzere Aufladefahrten mit ökologisch günstigeren Verkehrsmitteln (z. B. Lastenräder) und längere Rollerlebensdauern erreicht werden.
- ▶ **SPNV Schleswig-Holstein:** Im Zeitraum zwischen 2006 und 2016 wurde der SPNV in Schleswig-Holstein ausgebaut (zusätzliche Zugkapazitäten und Elektrifizierung). In der Analyse wurde überprüft, welche Umweltwirkungen daraus resultierten. Verglichen wurden drei Fälle. Ohne Erweiterung des Angebots, wären die THG-Emissionen durch die zusätzliche Nachfrage (durch steigende Bevölkerung und Pendlerströme) zwischen 2006 und 2016 um 2.344 t CO_{2eq} jährlich gestiegen. Wird die tatsächliche Entwicklung betrachtet und die zusätzlichen Fahrgäste, die nicht durch die zusätzliche Nachfrage aufgrund des Bevölkerungswachstums erklärbar sind, als allein durch das bessere Angebot induzierte Verkehre angenommen, so ist eine Erhöhung der jährlichen THG-Emissionen von 14.460 t CO_{2eq} festzustellen. Wenn jedoch diese zusätzlichen Fahrgäste durch das verbesserte Bahnangebot allein durch Verlagerung vom Pkw auf den Zug zurückzuführen wären, würde dies eine Reduktion von 32.305 t CO_{2eq} pro Jahr bedeuten.

Schlussfolgerungen

Die Studie liefert eine aktuelle und umfassende Datenbasis sowie methodische Grundlagen für die ökologische Bilanzierung von Verkehrsarten

- ▶ für den Vergleich der Verkehrsarten in Deutschland im Status quo und
- ▶ für die Quantifizierung systemischer Änderungen im Verkehrssystem.

Die Status quo-Betrachtung ist gut geeignet für die Quantifizierung und den Vergleich der ökologischen Wirkungen der Verkehrsarten für die verschiedenen Wirkungskategorien und der externen Kosten unter Einbezug aller relevanten Lebenswegabschnitte.

Für die Quantifizierung systemischer Änderungen wurde eine Vorgehensweise vorgeschlagen, die alle relevanten Einflüsse berücksichtigt. Die Anwendung der Methode anhand konkreter Betrachtungsfälle zeigt jedoch, dass viele Unsicherheiten bei der modellhaften Abbildung von Veränderungen bestehen.

Die getroffenen Annahmen bei einer systemischen Bilanzierung sollten daher sehr transparent dokumentiert werden, die Ergebnisse sollten eher mögliche Bandbreiten darstellen, abhängig auch davon, mit welcher Tiefe der Betrachtungsfall analysiert und aufbereitet wurde.

Summary

There is great demand for ecological comparisons of different types of transport in the environmental policy debate and these comparisons are used for a wide range of purposes. Current environmental comparisons or assessments are usually based on status quo analyses. For instance, the German Federal Environment Agency publishes annual energy consumption and emission statistics for passenger and freight transport in Germany for the current reference year. However, the available data and assessment approaches are insufficient for many questions. The aim of this study was therefore to update and expand key indicators and approaches for ecological assessment and comparison of different types of transport.

For this purpose, the comparison of types of transport included the entire life cycle of the vehicles, from manufacture to use phase and disposal, as well as the required transport infrastructure. The following life cycle stages were explored:

- ▶ Use phase (vehicle operation including energy consumption and exhaust emissions)
- ▶ Energy supply of fuels and electricity
- ▶ Production, maintenance and disposal of vehicles
- ▶ Construction, maintenance and operation of the required transport infrastructure

All relevant modes of transport (road, rail, water and air) as well as the associated means of transport were analysed. Domestic passenger and freight traffic as well as international air traffic as far as the first landing abroad were considered.

Table 1: Types of transport included in the analysis

Term	Content
Mode of transport	Road, rail, water, air
Transportation mode	Passenger transport, freight transport
Type of transport	Foot traffic, bicycle traffic, motorised individual transport, car sharing, public transport road, public transport rail (divided into local rail passenger transport and long-distance rail passenger transport), long-distance bus transport, coach transport, road freight transport, rail freight transport, inland waterway transport (freight), air transport (freight and passengers)
Means of transport	On foot, bicycle, pedelec, car, motorcycle, moped, local and regional bus, long-distance bus, coach, tram, city railway, metro, long-distance train, local train, cargo bike, light commercial vehicle, lorry, truck train, articulated truck, freight train, inland waterway vessel, aircraft

Transport in Germany is associated with a range of environmental impacts. The most important of these were investigated in a comparison of types of transport. The following impact categories were assessed:

- ▶ Greenhouse gas emissions
- ▶ Air pollutants: nitrogen oxides (NO_x), particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) and carbon monoxide, non-methane hydrocarbons and sulphur dioxide

- ▶ Resource consumption based on cumulative energy demand (CED), cumulative raw material demand (CRD) and land use

In addition to these classic impact indicators, noise pollution, traffic accidents and external costs were also included in the transport type comparison.

Initially, mean indicators were determined for all types of transport, impact categories and life cycle stages considered in this study. A distinction was made between local and long-distance passenger transport and freight transport. All values were analysed in reference to the transport performance in passenger-kilometres (pkm) or tonne-kilometres (tkm). The analyses were based on the average vehicle fleet at average load factor and operating mode in Germany in 2017.

Greenhouse gas emissions

Reducing the climate impact of transport is one of the most urgent challenges to be tackled in the coming years. Important indicators are carbon dioxide emissions from the combustion of fossil fuels and other greenhouse gases such as methane and nitrous oxide. For air traffic, an additional climate impact has been demonstrated through the emission of water and other emissions at high altitudes. With the Emission Weighting Factor (EWF), this effect was also taken into account.

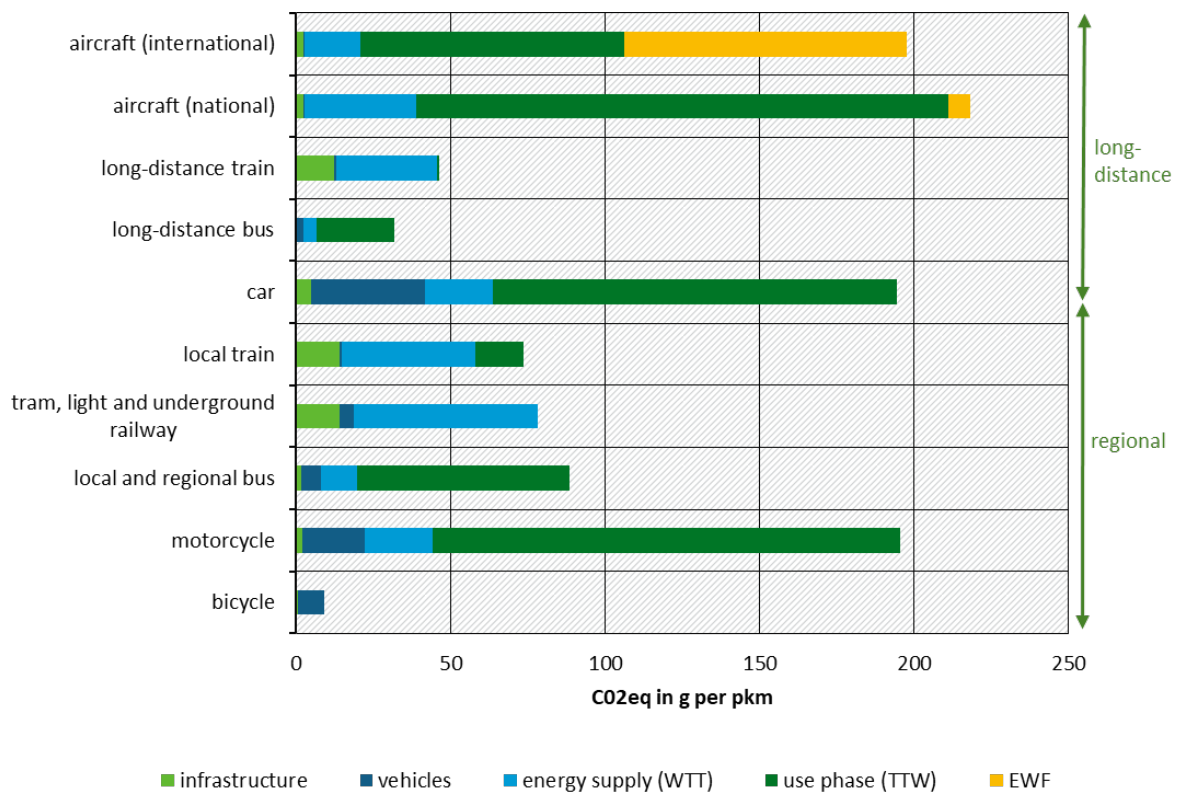
In this study, greenhouse gases and the EWF are combined and hereafter referred to as "climate impact". The unit of the climate impact is CO₂ equivalents (CO_{2eq}). The most important results for the average climate impact of the different types of transport are as follows:

- ▶ For passenger transport, bus and rail services perform best per pkm. Here, long-distance transport is superior to local transport. However, this is put into perspective in the assessment of total emissions by the fact that the distances travelled in long-distance transport are significantly longer than in local transport.
- ▶ The specific emissions of the means of motorised individual transport (cars and motorcycles) per pkm exceed those of buses and trains by an average of two to five-fold.
- ▶ Air travel is associated with the greatest climate impact, with the additional climate impact operating at high altitudes becoming more relevant as travel distances increase. Air travel thus results in high total emissions per trip due to the combination of high specific emissions and long travel distances.

A look at the different life cycle stages reveals the following:

- ▶ Greenhouse gas emissions from motorised types of transport are strongly driven by vehicle operation and energy supply, whereas vehicle and infrastructure supply combined account for a much lower share. This is due to the fact that fossil sources of energy continue to dominate both fuels and electricity.
- ▶ In road transport, emissions from the vehicle production stage are higher than for the infrastructure. In rail transport, the higher emissions arise during infrastructure provision.

Figure 1: Climate impact of passenger transport in Germany in 2017



Source: own calculations

For land-based freight transport, the climate impact of road transport per tkm transported is highest, while rail freight transport and inland waterway shipping are associated with considerably lower climate impacts. In road transport, vehicle size is a major factor determining specific emissions in freight transport. While the specific greenhouse gas emissions of heavy-duty vehicles and articulated lorries under medium loads are three times higher than for rail transport, this figure rises to a factor of seven to 18 for smaller vehicles. The climate impact of air transport is particularly high, exceeding that of rail transport by a factor of 45 to 62.

Air pollution

For air pollutants, the local effect is usually most relevant. Therefore, direct exhaust emissions should be assessed differently than emissions from energy, vehicle and infrastructure supply, most of which do not occur in close proximity to human settlements. In recent years, exhaust emissions have been considerably reduced by exhaust gas legislation. Nevertheless, the applicable limits for air pollution, especially for NO₂ and PM₁₀, are still not universally met. In most areas of non-compliance, road traffic contributes with relevant quantities to air pollution.

The indicators derived in this study show that NO_x emissions arising during direct vehicle operation of passenger cars, motorcycles, buses, trucks, inland waterway vessels and aircraft play a major role. In the case of PM₁₀ emissions, however, infrastructure and vehicle provision are more relevant. Nevertheless, direct PM₁₀ emissions still considerably differ between individual means of transport, e.g. two-stroke mopeds and motorcycles are associated with high PM₁₀ pollution. Air traffic also has relatively high specific NO_x and PM₁₀ emissions, but their impact should be assessed differently than those of road vehicles.

Since the results for the various air pollutant emissions differ greatly depending on both type of transport and life cycle stage, generalised statements are not particularly meaningful. Instead, a detailed analysis and evaluation depending on the specific question is required.

Land use

The construction of transport infrastructure (roads, railways, airports, canals, etc.) is usually accompanied by a transformation of natural areas. The subsequent use of the infrastructure causes land occupation and prevents the respective areas from returning to a natural state.

As different means of transport generally share the same transport infrastructure, a form of allocation is usually required to determine the land use of different types of transport. To reflect the fact that allocations are always based on subjective values, two different allocation methods were used in this project, resulting in substantially different results. Variant A is based on the area temporarily occupied by individual vehicles during the journey, taking into account the time required for the vehicle to cover one kilometre, the width of the traffic lane required and the annual mileage by which this area time is multiplied. Variant B is based on the approach that the required traffic area is determined by both the annual mileage and the vehicle size (base area). Variant B is used in many life cycle assessments and also in the ecoinvent database and as the basis for determining specific environmental costs per area. Variant A was proposed by the German Federal Environment Agency, but is not common in life cycle assessment. Traffic areas are credited exclusively for transport use with two exceptions: 50 % to 90 % of municipal roads are allocated to development efforts, and 7% of airports are allocated to non-commercial flights.

In Variant A, local rail transport causes by far the greatest land use per pkm. It is followed by domestic flights, motorcycles, mopeds, cars, bicycles, trams, light rail, underground and long-distance rail. Local buses, international flights as well as long-distance buses and coaches cause the smallest land use per pkm in this allocation.

In Variant B, local rail transport and domestic air transport cause the highest specific land use (per pkm) in passenger transport. They are followed by passenger cars, long-distance rail transport, motorcycles, tramways, light rail, underground rail and local buses. Long-distance buses and coaches, international flights, bicycles and mopeds cause the least land use per pkm in Variant B.

In freight transport, both variants converge on a more similar picture. National flights cause a very high land occupation per tkm. For inland waterway transport, the land use depends strongly on the river. Because of the heavy use of the Rhine, the land use caused by Rhine waterway transport is only slightly higher than that of rail freight transport. The figure for canals is around three times higher, while the land use caused by transports on other rivers increases approx. 20-fold. Heavy-duty vehicles and international flights cause the least land use per tkm, although rail freight transport land use is almost twice that of heavy-duty vehicles.

Environmental costs

Transport activities incur a range of economic costs due to negative environmental impacts. These costs, often referred to as external costs or environmental costs, are usually not borne by the polluter but by the general public. To enable an aggregated analysis of various environmental impacts in an ecological assessment of types of transport, environmental costs are a useful parameter. They also provide information on the economic follow-up costs of transport.

In the present study, environmental costs were calculated for those impact categories for which both sound environmental impact data (see previous sections) and established approaches to monetise these environmental impacts are available. The procedure for monetarisation is

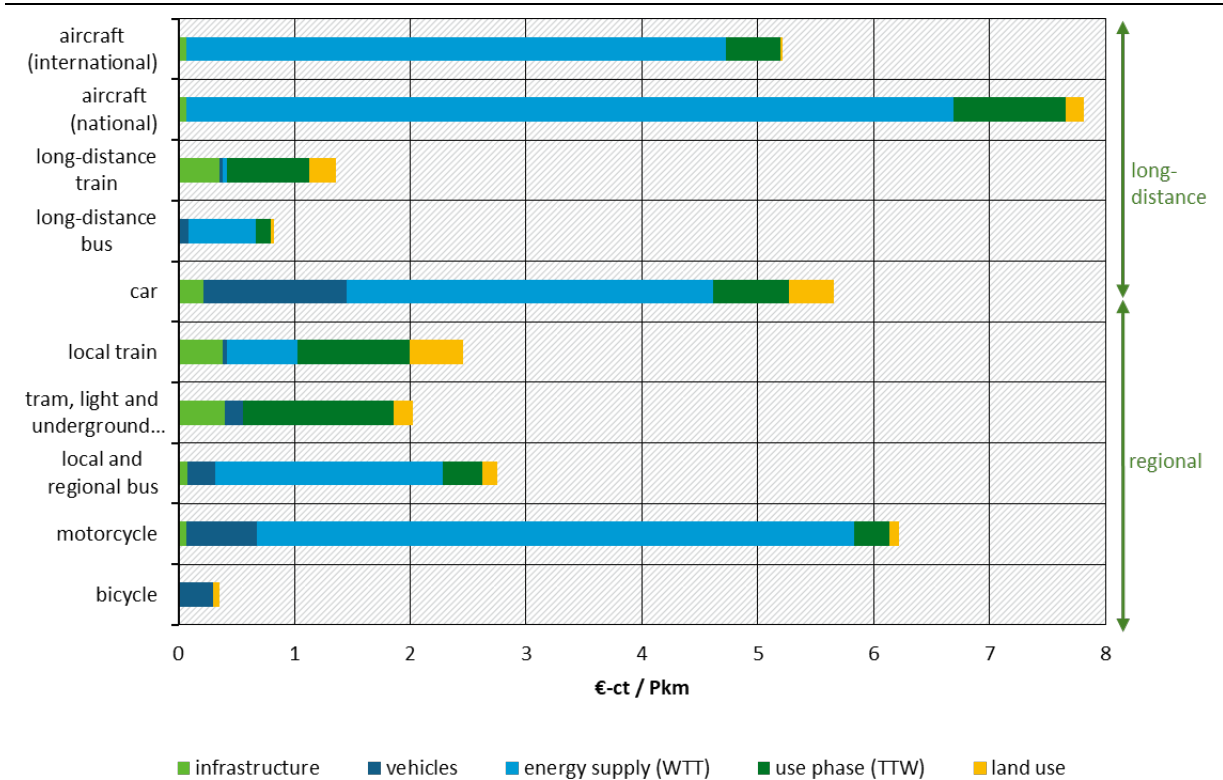
largely based on the UBA Methodological Convention 3.0 (Umweltbundesamt, 2019a). The environmental costs presented in the following include the costs resulting from air pollutant and greenhouse gas emissions arising during operation (Tank-to-Wheel: TTW), energy supply (Well-to-Tank: WTT), and the manufacture and maintenance of vehicles and infrastructure. In addition, environmental costs of land use leading to loss and fragmentation of natural habitats are included. In contrast, Noise costs are not covered in the main results, but analysed in a separate section (cf. Chapter 2.5.3).

The following figure illustrates the environmental costs of passenger transport in Germany, expressed in €-cent per passenger kilometre (€-ct/pkm). When comparing the data, it is essential to consider long-distance and short-distance transport separately, as substitution of the various types of transport is generally only feasible within long-distance and short-distance transport.

In long-distance passenger transport, the highest environmental costs are incurred by domestic air transport (nearly 8 €-ct/km), followed by private cars and international air transport, with environmental costs ranging between 5 and 6 €-ct/pkm. The environmental costs of long-distance rail transport (nearly 1.4 €-ct/pkm) as well as coaches and long-distance buses (approx. 0.8 to 1 €-ct/km) are distinctly lower.

In regional passenger transport, passenger cars and motorcycles are causing the highest environmental costs (approx. 5-6 €-ct/pkm). In contrast, the environmental costs of local public transport are less than half: the environmental costs of urban rail transport (trams, light rail and underground), local rail transport and local bus services range between 2 and 2.75 €-ct/pkm. The lowest environmental costs are caused by non-motorised bicycle traffic, where only the production of the vehicle and infrastructure as well as land use are relevant.

Figure 2: Environmental costs of passenger transport in Germany in 2017



Source: own calculations

In freight transport, air transport incurs the highest environmental costs (30 to 60 €-ct per tkm). For land transport, the environmental costs are lowest for rail freight transport at around 1 €-ct per tkm and inland waterways at around 1.8 €-ct per tkm. This is followed by the highest category of heavy-duty vehicles (truck trains /articulated trucks over 34t) with environmental costs of around 2.8 €-ct/tkm. The environmental costs of the average truck amount to 3.4 €-ct/tkm. The smaller the road freight vehicles, the higher the average environmental costs per tonne-kilometre. In consequence, the environmental costs per kilometre are higher in local freight transport than in long-distance freight transport.

Extension of the ecological assessment of transport systems

The average indicators described in the previous sections are typical elements of a status quo analysis. Such an analysis characterises the state of transport at a specific location (here Germany) within a specific time frame (here the year 2017). The results of this analysis allow an estimate of which means of transport compare favourably with others in the individual impact categories (NO_x, GHG, etc.). For instance, a long-distance rail journey emits on average around 46 g CO_{2eq}/pkm (including vehicle and infrastructure). Thus, the railways perform significantly better than the car with 194 g CO_{2eq}.

However, these values do not allow to conclude that the individual decision of a person to travel more than 100 km by car instead of by train generates 19.4 kg CO_{2eq} and that emissions of 4.6 kg CO_{2eq} are avoided by rail. The difference of 14.8 kg CO_{2eq} therefore does not correspond to the avoided GHG emissions resulting from the shift from one transport type to another. There are several reasons for this. On the one hand, the specific value of a means of transport can deviate significantly from the average. On the other hand, additional boundary conditions are not taken into account by the status quo analysis, but they may be important in case of system changes or under real use conditions. In addition, the representation is limited to the environmental impacts per distance travelled. Thus, conclusions about the environmental impacts of the entire journey should not be drawn.

Different systemic effects may thus lead to deviations from the status quo. The following list provides an overview of the limits of a status quo analysis:

- ▶ The degree of capacity utilisation has a considerable influence on the environmental impact per person. If only one person travels in an average passenger car, this results in approx. 280 g CO_{2eq} per pkm compared to 194 g CO_{2eq} (including vehicle and infrastructure) at average capacity utilisation. The result for one person is higher because the environmental impacts of the journey are distributed among fewer people.
- ▶ Means of transport may cause different environmental impacts depending on their individual usage profile. If a car is driven little and used mainly in local traffic (in urban areas), the emission factors differ from those of a car that is driven primarily on the motorway.
- ▶ Individual consumer decisions may directly influence the use of individual transport but not the public transport services on offer. In the short term, there is an initial change in the use of public transport before the services on offer are adjusted.
- ▶ The average indicators do not reflect complex journeys with a series of legs. Although the environmental impacts per passenger-kilometre for a train journey are considerably lower than for a car, other means of transport are often used to get from the origin to the station or

from the station to the final destination. These legs of the journey are associated with additional environmental impacts.

- ▶ To determine the environmental impacts of a particular route, the actual length of the route is also relevant. The distances travelled between origin and destination may vary. For instance, city buses often serve intermediate stops, which are not usually located directly on the way from start to finish. In consequence, the distance covered is often longer than when travelling by car.

For the modelling of such systemic effects, the study proposes the following methodology.

Methodology for systemic analyses

Environmental assessments carried out to reflect changes in transport must take into account all the relevant environmental benefits and burdens resulting from the changes. Specifically, in a systemic assessment it must be considered

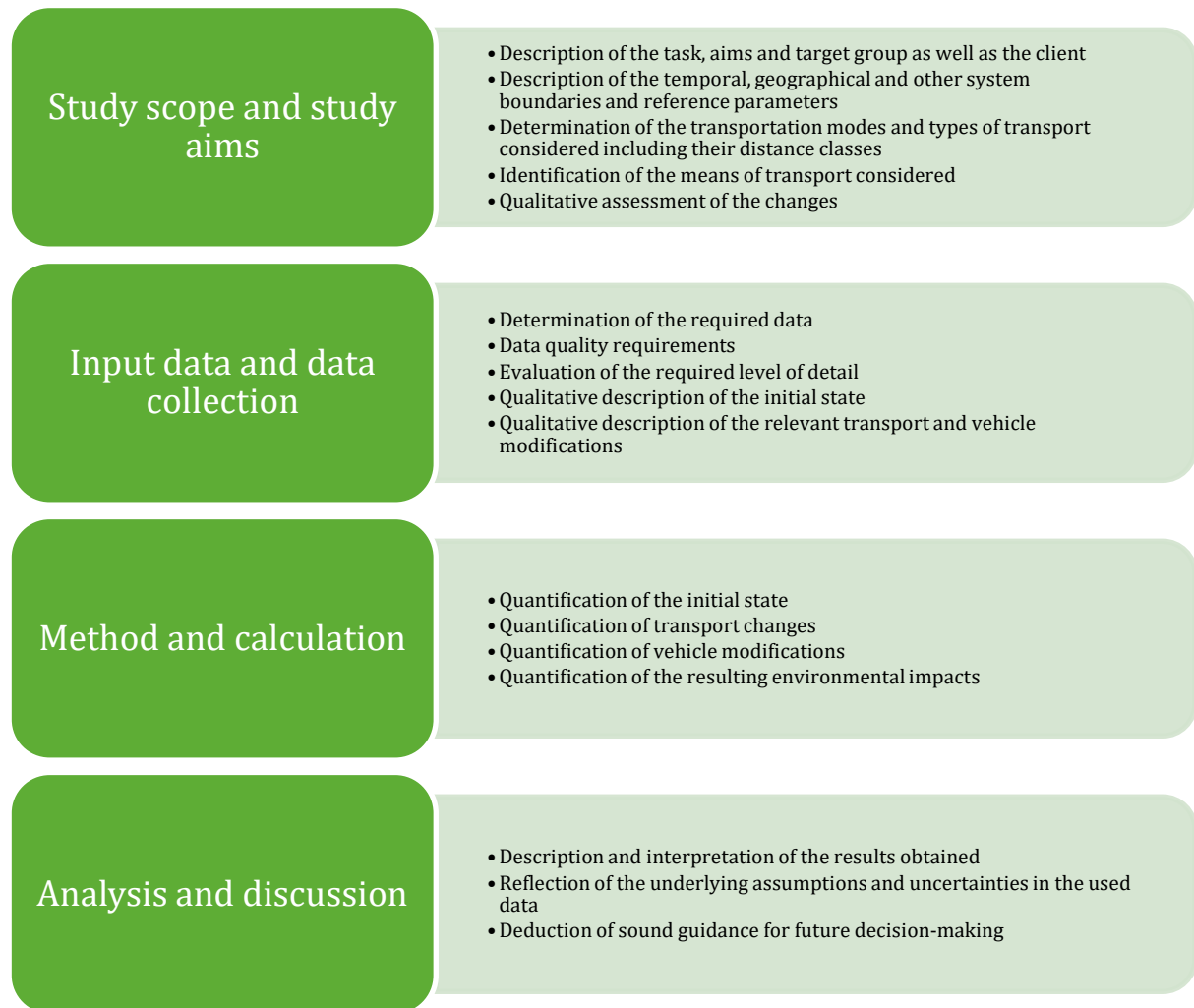
- ▶ between which modes of transport and to which extent shifts occur ,
- ▶ which changes along journeys with multiple legs (changed routes and thus changed route lengths, changed or new multimodal route chains, e.g. the pre- and post-journey legs for getting to the stop) occur,
- ▶ and whether journeys are initiated or cancelled for the types of transport in question.

There is a great range of potential questions that can be quantified and evaluated with a systemic modelling approach. It is therefore important that the underlying assumptions and the chosen approach, as well as the resulting uncertainties, are presented in a transparent manner so that the results can be interpreted correctly.

As a rule, any model considers the difference resulting from the shift between the initial situation and the status after the change. Although the transformation process is also relevant, the quantification focuses on the difference between the final state and the initial state.

In this study, the systemic assessments were prepared and discussed for selected exemplary questions, the so-called scenarios. A systemic assessment method was developed. The following figure provides an overview of the individual steps. The method is iterative, thus it is not mandatory to carry out the steps strictly in the order shown. For example, the data collection may well influence the assessment and the adopted framework conditions.

Figure 3: Flow chart of a systemic assessment



The methodology described here was applied to all cases explored. During this process, it became evident that the method for environmental impact assessment differs for each case under investigation due to the different nature of the specific questions, data availability and complexity of the analysis.

Scenarios

In total, the project included one scenario for freight transport and five scenarios for passenger transport. Half of the scenarios examined the potential for a shift to more environmentally friendly means of transport. The first step was to determine the initial status for each case. Subsequently, possible modal shifts were examined and their potential environmental impacts determined. Two scenarios focused on the introduction of a novel means of transport. In the last case, the effects of an expansion of local rail passenger transport already completed were analysed.

Table 2: Overview of the scenarios and the respective questions

Scenario	Question
Cargo bike use in inner-city distribution traffic	Potential for a shift from parcel delivery to cargo bike concepts in urban areas

Scenario	Question
Development of bicycle highways	Potential for a shift from local public transport to bicycle/pedelec by building new cycle paths
Shift from air traffic to train via high-speed rail links	Potential for a shift from German domestic flights to rail by reducing the travel time for long-distance rail travel
Liberalisation of the long-distance bus market	Potential real effects of the introduction of long-distance buses
Introduction of free-floating electric scooter rental systems	Potential real effects of the introduction of e-scooter rental schemes
Expansion of public rail transport in Schleswig-Holstein	Potential real effects of the expansion of local public rail transport in Schleswig-Holstein between 2006 and 2016

The scenario modelling provided the following key results:

- ▶ The **use of cargo bikes in inner-city distribution traffic** has the potential to shift between 320 and 800 million parcel deliveries in urban areas annually away from delivery by light commercial vehicles (LCVs). If an average of 640 million parcels are shifted, this can lead to an annual greenhouse gas reduction of 36,500 t CO_{2eq}, despite the consideration of the lorry journeys required to deliver parcels to inner-city micro-depots. Further positive effects can be expected from a reduction in inner-city pollutant emissions
- ▶ The **new construction or expansion of bicycle highways** in four urban regions has the potential to avoid annually between 2,000 and 9,500 t CO_{2eq}, depending on the region, by shifting journeys from motorised individual transport to the bicycle. Furthermore, reductions in inner-city NO_x emissions are expected.
- ▶ A **reduction in travel time for long-distance rail services** between the cities with the highest volume of air passengers could reach up to 3.8 million passengers per year. If the increased use of ICE sprinter trains leads to a reduction in the number of flights on offer and a rise in the capacity utilization of long-distance rail services, this shift could save up to 286,800 t CO_{2eq} annually. In contrast, if the flight connections are maintained and additional trains are used, the reduction in travel time can even lead to additional emissions compared to the initial situation. A potential shift from other types of transport due to the acceleration of rail traffic was not considered here.
- ▶ The **liberalisation of the long-distance bus market** in Germany has initially led to additional emissions from the new long-distance buses. About 10 % of passengers would not have started their journey without the new service. Most long-distance bus passengers had previously travelled by train (44 %), by plane (4 %) or as car passengers (23 %). Only 15 % of bus passengers had previously travelled as drivers in their own cars, so these journeys have been removed by the new service. The avoided car journeys saved a total of 48,400 t CO_{2eq} annually as a result of liberalisation. Greater reductions in greenhouse gas emissions could be achieved by a parallel adaptation of the rail and air transport services.

- ▶ An **e-scooter** from a rental scooter provider causes between 71-400 g CO_{2eq}/pkm, depending on the scooter's lifetime and the type of charging. The assessment of the e-scooters thus strongly depends on their area of operation. If e-scooters are used primarily as a means of access to public transport, thus avoiding car journeys, they can lead to a reduction in environmental pollution. However, this effect is (over)compensated by newly added e-scooter rides that replace journeys on foot. Thus, the introduction of e-scooters in Berlin has probably led to an additional 4,000 t CO_{2eq} emitted annually. Improvements in the e-scooter assessment can be achieved primarily through shorter charging trips with ecologically more favourable means of transport (e.g. cargo bikes) and longer scooter lifetimes.
- ▶ **Public rail transport Schleswig-Holstein:** In the period between 2006 and 2016, public rail transport in Schleswig-Holstein was expanded (additional train capacities and electrification). The analysis examined the resulting environmental impacts. Three cases were compared. Without the expansion of supply, GHG emissions would have increased by 2,344 t CO_{2eq} annually between 2006 and 2016 as a result of additional demand (from increasing population and commuter flows). If the actual development is considered and the additional passengers, which cannot be explained by the additional demand due to population growth, are assumed to be journeys induced by the improved service alone, the increase in GHG emissions rises to 14,460 t CO_{2eq} annually. If, however, these additional passenger volumes arose solely from a shift from car to train as a result of the improved rail service, this would mean an annual reduction of 32,305 t CO_{2eq}.

Conclusions

The study provides current and comprehensive data and a methodological framework for the ecological assessment of types of transport

- ▶ for the comparison of the status quo for different types of transport in Germany and
- ▶ for the quantification of systemic shifts in the transport system.

The status quo analysis is well suited for the quantification and comparison of ecological effects associated with different types of transport considering a range of impact categories and external costs, and including all relevant life cycle stages.

For the quantification of systemic shifts, a methodology was proposed that takes all relevant factors into account. However, the application of the method in the specific scenarios revealed a number of uncertainties in the modelling of changes.

The assumptions made in a systemic assessment should therefore be documented in a very transparent manner and the results should be presented as potential ranges rather than absolute values. The output is also dependent on the level of detail with which the case in question was analysed and interpreted.

1 Zielstellung

1.1 Ausgangslage

In der umweltpolitischen Diskussion, z. B. bezüglich der lebenswerten Stadt oder zur Klimakrise, sind Verkehrsartenvergleiche sehr gefragt und werden für unterschiedlichste Zwecke verwendet. Das bisher verwendete Instrumentarium entspricht den gewachsenen Anforderungen nur noch begrenzt.

- ▶ So kann die durchschnittliche Verkehrsmittelnutzung in Deutschland gut wiedergegeben werden, bei dem Vergleich für speziellere Anwendungsfälle, z. B. Vergleich konkreter Relationen, stößt die bisher verwendete Methodik jedoch an ihre Grenze.
- ▶ Verbesserungen des Emissionsverhaltens innerhalb von Antriebstechnologien können gut abgebildet, aber Wechsel von Antriebstechnologien oder Verkehrsträgerverlagerungen im großen Stil benötigen für einen sinnvollen Vergleich die Betrachtung von vorgelagerten Prozessen, wie die Fahrzeug- oder Infrastrukturbereitstellung.
- ▶ Umweltwirkungen werden zumeist auf wenige Parameter, wie THG-Emissionen, reduziert und damit weitere Wirkungskategorien außen vorgelassen.

Aktuelle Umweltvergleiche oder -bilanzen bauen in der Regel auf Status quo-Betrachtungen auf, beispielsweise ...

- ▶ die vom Umweltbundesamt jährlich veröffentlichten Energieverbrauchs- und Emissionskennzahlen der Verkehrsmittel des Personen- und Güterverkehrs in Deutschland im aktuellen Bezugsjahr, basierend auf dem TREMOD-Modell
- ▶ ökologische Bilanzierungstools wie EcoTransIT und EcoPassenger.

Bisher fehlen in TREMOD und den darauf basierenden Umweltkennzahlen des Umweltbundesamtes die Lebenswegabschnitte des Fahrzeug- und Infrastrukturbaus, -betriebs und der -wartung. Außerdem werden bisher lediglich der Energieverbrauch sowie Klimagas- und Luftschadstoffemissionen abgebildet. Es fehlen Daten, etwa zum Ressourcenverbrauch und zur Flächenbewertung.

In vielen Fällen ist die ökologische Bilanzierung auf Basis einer Status quo-Betrachtung nicht ausreichend, da sie Veränderungen im Verkehrssystem nicht richtig abbildet. Für solche aussagekräftigen Vergleiche müssen daher systemische Analysen durchgeführt werden, die auch Veränderungen (z. B. Einführung von neuen Systemen wie Fernlinienbusse oder Umweltwirkungen durch die Verlagerungen) sowie Wechselwirkungen mit anderen Sektoren (z. B. dem Stromsektor) berücksichtigen.

1.2 Ziele

In diesem Vorhaben soll eine umfangreiche und detaillierte Datengrundlage für die ökologische Bilanzierung des inländischen Personen- und Güterverkehrs einschließlich aller Lebenswegabschnitte (Nutzungsphase, Energie-, Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung) für wichtige Wirkungskategorien (THG- und Luftschadstoffemissionen, kumulierter Energieaufwand, kumulierter Rohstoffaufwand, Verkehrsflächen) erstellt werden. Zusätzlich

werden Verkehrsunfälle sowie die Umweltkosten für die genannten Kategorien und zusätzlich für die Lärmwirkung ermittelt

Die Bilanzierung der Umweltwirkungen erfolgt für verschiedene Betrachtungsebenen: Status quo- bzw. Durchschnittsbetrachtungen werden ebenso berücksichtigt wie dynamische Effekte bei Veränderungen von Verkehren mit den Auswirkungen auf das Gesamtsystem. Im Rahmen des Projekts wird auch eine Methodik für die ökologische Bilanzierung in den verschiedenen Betrachtungsebenen entwickelt.

1.3 Vorgehen

Entsprechend der Aufgabenstellung gliedert sich der Bericht in folgende Abschnitte:

- ▶ Ermittlung der Vergleichsgrundlagen für die ökologische Bilanzierung (Kapitel 2)
- ▶ Entwicklung einer Vergleichs- und Bilanzierungsmethodik für verschiedene Betrachtungsebenen (Kapitel 3)
- ▶ Ergebnisse der Bilanzierung für die verschiedenen Betrachtungsebenen (Kapitel 4)

2 Vergleichsgrundlagen

2.1 Stand der Forschung

Im Bereich der Verkehrsartenvergleiche gibt es einige Vorarbeiten, auf die aufgebaut werden kann. In diesem Kapitel werden im ersten Teil zwei grundsätzliche Methoden zur Berechnung der Umweltwirkungen im Verkehr vorgestellt. Im zweiten Teil erfolgt eine Übersicht über die Werke, die als Grundlage für die Weiterentwicklung der ökologischen Bilanzierung von Verkehrsarten verwendet wurden, sei es als Datenquelle oder für die Methodenentwicklung.

2.1.1 Methoden für Verkehrsmittelvergleiche

Regelwerk EN 16258

Die europäische DIN Norm EN 16258 „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)“ (DIN, 2012) beschreibt die Methode und die Anforderungen an die Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch bei Transportdienstleistungen. Neben dem direkten Fahrzeugbetrieb wird hier auch die Bereitstellung von Strom und Kraftstoffen miteinbezogen – dies entspricht also einer Well-to-Wheel-Bilanzierung. Aufwendungen für die Infrastruktur sind ausdrücklich ausgenommen. Ziel der Norm ist es einen einheitlichen und transparenten Ansatz für die Berechnung und die Bereitstellung zu schaffen.

Die Norm enthält neben Angaben zur Bestimmung der energetischen Vorketten auch bereits Well-to-Tank- und Tank-to-Wheel-Faktoren für fossile und biogene Kraftstoffe.

Aufbauend auf dieser EN-Norm beschreibt der DSLV-Leitfaden „Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik“ (Schmied/Knörr 2013) das detaillierte Vorgehen bei der Erstellung von Berechnungen nach EN 16258.

Der Leitfaden „Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV“ (Schmied/Mottschall 2013) liefert die Beschreibung für das Vorgehen bei EN 16258-konformen Berechnungen für den Personenverkehr.

Die EN 16258 bildet die Basis für viele Unternehmensbilanzen im Transportsektor und wird z. B. als methodische Grundlage für das Tool EcoTransIT World genutzt. Die mit der EN 16258 entwickelten Methoden bauen auf dem Erfahrungsschatz auf, der auch Grundlage der Weiterentwicklung des Verkehrsartenvergleichs ist. Methodisch bildet die EN 16258 die individuelle Sicht auf konkrete Transportvorgänge ab.

Ökobilanzen

Während bei der EN 16258 lediglich die Well-to-Wheel-Emissionen berücksichtigt werden, ist das Ziel einer Ökobilanz alle relevanten Lebenswegabschnitte und Emissionen von der „Wiege bis zu Bahre“ zu berücksichtigen. Die methodischen Grundlagen für eine Ökobilanz sind in den ISO-Normen 14040 und 14044 beschrieben (ISO, 2006a), (ISO, 2006b). Die Kennzahlen aus Ökobilanzen bilden eine wichtige Grundlage für die ökologische Bilanzierung von Verkehrsarten in dieser Studie.

Eine Ökobilanzierung nach ISO 14040/44 enthält die folgenden Schritte:

- ▶ Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen
- ▶ Sachbilanz

- ▶ Wirkungsabschätzung
- ▶ Auswertung.

Zunächst werden **das Ziel und der Untersuchungsrahmen** der Ökobilanzierung festgelegt. Der Nutzen oder die Funktion des betrachteten Produktes werden festgelegt. Hierfür wird die sogenannte „funktionelle Einheit“ des Produktsystems bestimmt. Üblicherweise enthält eine Ökobilanz den kompletten Lebensweg eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über die Nutzung bis zur Entsorgung, teilweise werden die Systemgrenzen aber auch so gewählt, dass bestimmte Abschneidekriterien gelten.

Die anschließende **Sachbilanz** dient der Datenerhebung und Quantifizierung der mit der funktionellen Einheit zusammenhängenden Aufwendungen (z. B. an Rohstoffen) und der hiermit verbundenen Emissionen.

Diese Sachbilanzindikatoren werden dann in der **Wirkungsabschätzung** in Wirkungskategorien zusammengefasst (z. B. dem Treibhausgaseffekt).

Zuletzt erfolgen die **Auswertung** und Diskussion der Ergebnisse sowie eine Bewertung der vorhandenen Unsicherheiten (oftmals anhand von Sensitivitäten, d. h. der gezielten Variation einzelner, zentraler Parameter um ihren Einfluss auf das Gesamtergebnis zu ermitteln).

Aufbauend auf den ISO-Normen gibt es weitere Ökobilanzleitfäden wie z. B. das ILCD-Handbuch (EC - Joint Research Centre, 2010), die genauere Anweisungen für Ökobilanzen in bestimmten Sektoren enthalten oder den Methodenbericht zur Schweizer Ökobilanzdatenbank ecoinvent 3 (Weidema et al., 2013), der die methodischen Grundlagen einer Ökobilanzdatenbank beschreibt.

2.1.2 Wichtige Grundlagen für den Verkehrsartenvergleich

Der ökologische Verkehrsartenvergleich baut auf verschiedenen Basisdaten und vorliegenden Bilanzierungswerkzeugen und weiteren Quellen auf. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die wichtigsten grundlegenden Arbeiten, die verwendet wurden.

Tabelle 3: Übersicht über wichtige Grundlagen für den ökologischen Verkehrsartenvergleich

Name	Beschreibung	Umfang der Betrachtung	Art der Betrachtung	Zielgruppe	Wirkungskategorien	Verwendung im Verkehrsartenvergleich
ecoinvent 3 (Weidema et al., 2013)	Ökobilanzdatenbank	Vollständige Ökobilanz (cradle-to-grave inklusive Infrastruktur) für alle relevanten Verkehrsmittel	Attributive und konsequentielle LCA (etwa 17.000 Prozesse)	Hintergrunddaten für Ökobilanzierer	Große Auswahl an Sachbilanzindikatoren, Midpoint und Endpoint	Datenquelle
EcoTransIT (EcoTransIT, 2019)	Tool zur Erfassung der Emissionen im Güterverkehr weltweit	Well-to-Wheel-Betrachtung Schwere Nutzfahrzeuge, Güterzüge, See- und Binnenschiffe sowie kombinierter Verkehre	Parametrisierte Status quo-Betrachtung (strecken- und länderabhängige Kennwerte sowie Möglichkeiten Auslastungsgrade etc. selber anzupassen)	Unternehmensbilanzen, (Fach-)Öffentlichkeit	Energie, Treibhausgasemissionen und Luftschadstoffe	Methodische Grundlage
EcoPassenger (Knörr / Hüttermann, 2016)	Tool zur Erfassung der Emissionen im Personenfernverkehr weltweit	Well-to-Wheel-Betrachtung von Zügen, Pkw und Flugzeugen	Parametrisierte Status quo-Betrachtung (strecken- und länderabhängige Kennwerte)	(Fach-)Öffentlichkeit	Energie, Treibhausgasemissionen und Luftschadstoffe	Methodische Grundlage
TREMOD (Allekotte et al., 2020)	Abbildung des deutschen Verkehrs (Schiene, Straße, Wasser, Luft; Güter- und Personenverkehr)	Well-to-Wheel-Betrachtung	Ermittlung von Verkehrsmengen-gerüsten und Verknüpfung mit Emissionsfaktoren Zeitreihen von 1960 bis heute, sowie Szenarien bis 2050	Berichterstattung des Umweltbundesamtes, Fachöffentlichkeit	Energie, Treibhausgasemissionen und Luftschadstoffe	Datenquelle

Name	Beschreibung	Umfang der Betrachtung	Art der Betrachtung	Zielgruppe	Wirkungskategorien	Verwendung im Verkehrsartenvergleich
UBA-Vergleichstabellen für Verkehrsmittel (Umweltbundesamt UBA, 2020)	Spezifische Umweltkennzahlen je Personen-/Tonnenkilometer für die Verkehrsarten in Deutschland	Alle in TREMOD abgebildeten Verkehrsmittel; Well-to-Wheel-Betrachtung	Status quo-Betrachtung auf Länderebene	(Fach-)Öffentlichkeit	Energie, Treibhausgasemissionen und Luftschadstoffe	Methodische Grundlage
Mobitool (Tuchschnid / Halder, 2010)	Bewertung von Energieeffizienz und Umweltbelastung verschiedener Verkehrsmittel	Vollständige Ökobilanz (cradle-to-grave inklusive Infrastruktur) für alle relevanten Verkehrsmittel	Attributive Ökobilanz, teilweise basierend auf ecoinvent	Ökobilanzielle Bewertung des Verkehrs in der Schweiz für Unternehmen und (Fach-)Öffentlichkeit	Energie, Treibhausgasemissionen und Luftschadstoffe sowie Umweltbelastungspunkte und ReCiPe	Methodische Grundlage
STREAM CE Delft (Otten et al., 2015), (Otten et al., 2016)	Emissionsfaktoren für alle Verkehrsarten in den Niederlanden	Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel	Status quo-Betrachtung	Unternehmen, (Fach-)Öffentlichkeit	Energieverbrauch, Treibhausgas- und Schadstoffemissionen	Methodische Grundlage
Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland	Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland	Infrastrukturaufwendungen für alle relevanten Verkehrsträger	Umweltbilanzierung	(Fach-)Öffentlichkeit	Treibhausgase	Methodische Grundlage und Datenquelle für Infrastruktur

Name	Beschreibung	Umfang der Betrachtung	Art der Betrachtung	Zielgruppe	Wirkungskategorien	Verwendung im Verkehrsartenvergleich
(Mottschall/Bergmann 2013)						
VERUM 2.0 (Berger / Finkbeiner, 2017)	Vereinfachte Umweltbewertungen des UBA	Kompletter Lebensweg	Umweltbewertung	(Fach-)Öffentlichkeit	Treibhausgase, Luftschadstoffe, Ressourcen, Lärm, Strahlung, biologische und sonstige Belastungen (z. B. Unfälle)	Methodische Grundlage für Flächenbetrachtungen
UBA Methodenkonvention 3.0 (Doll, 2018a)	Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten	Kostenbewertung für alle relevanten Verkehrsmittel	Bestimmung der Umweltkosten	(Fach-)Öffentlichkeit	Umweltkosten für Treibhausgase, Luftschadstoffe, Lärm, Verkehr und Energie	Bestimmung der Umweltkosten
GEMIS 5 (Globales Emissions-Modell integrierter Systeme) (Fritsche, 2019)	Frei verfügbare, deutsche Ökobilanzdatenbank	Ökobilanzdaten für etwa 2.500 verschiedene Prozesse	Attributive Ökobilanz	Hintergrunddaten für Ökobilanzierer	Treibhausgase, Luftschadstoffe, Ressourcen, Fläche	Datenquelle für Strommix des Umweltbundesamtes

2.2 Grundlagen der Bilanzierung im Verkehrsartenvergleich

2.2.1 Sichtweise

Grundsätzlich sind bei Verkehrsträgervergleichen verschiedene Sichtweisen möglich.

Bei der **individuellen Sichtweise** stehen die Entscheidungen einzelner Akteure (z. B. von einer Person oder einem Unternehmen) im Vordergrund. Fragestellungen hierbei können sein, welche Umweltwirkungen eine einzelne Reise verursacht, aber auch welche Treibhausgasbilanz der Transportbereich eines Unternehmens aufweist.

Dabei werden verschiedene Wirkungen unterschieden:

- ▶ Voll beeinflussbare Wirkungen sind alle selber durchgeführten Transportvorgänge (z. B. Fahrten mit dem eigenen Auto oder Fahrrad).
- ▶ Bedingt beeinflussbare Wirkungen sind Transporte von beauftragten Unternehmen oder von Subunternehmen (z. B. beeinflussbar durch Vorgaben zu Nachhaltigkeitskriterien der Auftragnehmer), aber auch Charterverkehre.
- ▶ Nicht direkt beeinflussbar für die Nutzenden sind die Wirkungen öffentlicher Verkehrsmittel.

Der Rahmen bei der individuellen Sicht wird vorgegeben durch den Zugang zum Verkehrssystem (z. B. welche eigenen Fahrzeuge sind vorhanden oder wie gut ist die Anbindung an Systeme?), dem Mobilitätsbedarf, den eigenen Präferenzen sowie den Kosten.

Bei der Bilanzierung der individuellen Sichtweise liegt der Fokus üblicherweise auf den beeinflussbaren Wirkungen, für die individuelle Daten erhoben werden können, während die nicht beeinflussbaren Wirkungen mit durchschnittlichen (Status quo-)Werten quantifiziert werden.

Entscheidet sich eine Person beispielsweise dazu, den eigenen Pkw stehen zu lassen und stattdessen mit einem öffentlichen Verkehrsmittel zu reisen, entfällt aus individueller Sicht die Pkw-Fahrt und die Fahrt mit dem öffentlichen Verkehrsmittel (z. B. dem Zug) wird – sofern keine Kennzahlen für die konkrete Zugfahrt vorliegen – mit den durchschnittlichen Emissionen des genutzten Verkehrsmittels bewertet. Liegen detaillierte Umweltkennzahlen für die konkrete Zugfahrt vor, können diese verwendet werden. Eine Person mehr im Zug bedeutet dann, dass die gesamten Umweltwirkungen des Zugs auf alle Personen im Zug plus der zusätzlichen Person aufgeteilt werden. Damit tragen alle Personen im Zug die gleiche Last. Dies entspricht der von der EN 16258 vorgeschriebenen Allokationsregel.

Eine individuelle Bilanz wird umso genauer, je mehr die konkreten Randbedingungen berücksichtigt werden können, etwa die konkrete Wegelänge oder die gesamte Wegekette, indem auch der Vor- und Nachlauf (z. B. die Anfahrt zum Bahnhof) mitbetrachtet werden.

Bei der **gesellschaftlichen Sicht** hingegen wird die Außensicht der Gesellschaft und der öffentlichen Institutionen auf das Verkehrsgeschehen betrachtet. Hier ist prinzipiell das gesamte Verkehrsgeschehen beeinflussbar. Der Rahmen wird vorgegeben durch die Gesetzgebung, die technischen Möglichkeiten, die Finanzierung und Verhaltensweisen der Nutzer. Diese Sichtweise dient unter anderem der Politikberatung und ist daher Fokus der in diesem Projekt vorgestellten Methodik.

Fragestellungen sind neben der Erfassung der aktuellen Emissionen im Transportsystem die Auswirkungen von Veränderungen (z. B. durch die Einführung neuer Verkehrsmittel, den Ausbau von Infrastruktur oder durch politische Maßnahmen). Dabei zielen die meisten dieser Maßnahmen darauf ab, Verkehr entweder zu vermeiden, ein bestimmtes Verkehrsmittel zu verbessern oder Verkehr auf ökologisch günstigere Verkehrsmittel zu verlagern.

2.2.2 Vorgehensweise

Für die Bilanzierung der Umweltwirkungen im Verkehrsbereich gibt es (in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik) zwei grundsätzliche Vorgehensweisen: eine durchschnittliche (attributive) und eine marginale (konsequentielle) Vorgehensweise.

Für einen Verkehrsartenvergleich wird im Rahmen dieses Vorhabens immer eine attributive Vorgehensweise gewählt, d. h. es werden die durchschnittlichen Umweltwirkungen von Verkehrsarten innerhalb der zeitlichen, sachlichen und örtlichen Grenzen betrachtet. Dabei wird jedem (Personen- oder Tonnenkilometer) im System die gleiche Wirkung angelastet. Diese Vorgehensweise wird sowohl zur Bestimmung des Status quo (typische Nutzung) als auch für die systemische Untersuchung von Veränderungen im Transportsektor angewendet.

Auf die Auswertung von marginalen Wirkungen (also die Wirkung des letzten Personen- oder Tonnenkilometers im System) wird in dieser Studie bewusst verzichtet. Problematisch an solchen Marginalbetrachtungen ist die starke Nichtlinearität der marginalen Effekte (so hat z. B. eine weitere Person in einem nicht vollausgelasteten Verkehrsmittel vernachlässigbare Auswirkungen, 100 Personen mehr oder 10.000 Personen mehr führen jedoch zu ganz unterschiedlichen Effekten, je nachdem wie viele zusätzliche Fahrzeuge für den Transport benötigt werden). Insbesondere Lärmemissionen sowie Aufwendungen für Infrastruktur und Fahrzeuge sind stark nicht linear. Damit hängen die marginalen Wirkungen von der aktuellen Auslastung und den temporär/lokal schwankenden Kapazitäten und den Kapazitätsengpässen der Fahrzeuge und Infrastruktur sowie der Höhe der sich ändernden Verkehrsmengen ab – und lassen sich nicht generisch bestimmen.

Werden sehr kleine Änderungen betrachtet, erfolgt keine Systemanpassung. Aus gesellschaftlicher Sicht ist dann der Status quo ausschlaggebend. Bei der Betrachtung großer Änderungen stellt sich langfristig ein neuer Gesamtzustand ein, der dann wieder anhand einer attributiven Betrachtung erfasst werden kann. Schließlich kann der Unterschied zwischen dem Ausgangszustand und dem neuen Zustand ausgewertet werden, um die Wirkungen von systemischen Änderungen aufzuzeigen. Wichtig ist hierbei die Größe der Änderungen zu quantifizieren.

2.2.3 Betrachtungsebenen

Im Verkehrsartenvergleich werden drei Betrachtungsebenen unterschieden:

- ▶ Die erste Ebene beinhaltet die Beschreibung der ökologischen Potenziale der Verkehrsarten (z. B. aufgrund der Fahrzeugeigenschaften) ohne Berücksichtigung der verkehrlichen Nutzung.
- ▶ Die zweite Ebene berücksichtigt neben den Fahrzeugeigenschaften auch die typische verkehrliche Nutzung. Diese Ebene zielt darauf ab die ökologische Belastung durch die einzelnen Verkehrsarten im Status quo abzubilden.

- Die dritte Ebene stellt die Systembetrachtung dar. Der Fokus hierbei liegt auf den ökologischen Auswirkungen bei Änderungen im Verkehrssystem.

Der nachfolgende Text gibt einen kurzen Überblick über die Betrachtungsebenen. Das methodische Vorgehen wird für jede Betrachtungsebene detailliert in Kapitel 3 dargestellt.

Zunächst wird die **Potenzialbetrachtung** der Verkehrsarten beschrieben. Die Potenzialbetrachtung ermöglicht eine Gegenüberstellung der Bandbreiten der von einzelnen Verkehrsmitteln ausgehenden ökologischen Belastungen und basiert auf den vorab ermittelten ökologischen Eigenschaften der Verkehrsarten. Sie erlaubt also eine Einordnung der Verkehrsarten und ihrer Verkehrsmittel bezüglich ihrer potenziellen Umweltwirkungen: Werden die ökologischen Kennzahlen auf vergleichbare Nutzungsmuster bezogen, z. B. auf die mögliche Transportkapazität der Verkehrsmittel, d. h. pro angebotenen Platzkilometer (Personenverkehr) bzw. angebotenen Tonnenkilometer (Güterverkehr), ist eine von der tatsächlichen Nutzung unabhängige Einschätzung der Vor- und Nachteile der einzelnen Verkehrsmittel bei verschiedenen Wirkungskategorien möglich. Damit lässt sich auch die Bandbreite der ökologischen Belastung durch die einzelnen Verkehrsmittel unter verschiedenen Einsatzbedingungen aufzeigen und, etwa im Vergleich mit der Betrachtung der typischen Nutzung, eine Analyse erstellen, wieviel Potenzial zur Minimierung der spezifischen Belastung bei den Verkehrsmitteln vorhanden ist.

Die **Betrachtung der typischen Nutzung beschreibt den Status quo des Verkehrs an einem bestimmten Ort zu einem bestimmten Zeitraum**, z. B. die Situation des Personen- und Güterverkehrs in Deutschland im Jahr 2017. Die im betrachteten geographischen und zeitlichen Rahmen auftretenden verkehrlichen Aktivitäten werden erfasst und auf Basis der Kennzahlen aus der ersten Betrachtungsebene werden die Umweltwirkungen aus den verschiedenen Lebenswegabschnitten quantifiziert. Diese Sichtweise entspricht der heute üblichen Emissionsbilanzierung im Verkehr.

Im Rahmen dieser Verkehrsartenvergleichsstudie wird eine ökologische Bilanzierung für alle einbezogenen Verkehrsarten in Deutschland für das Bezugsjahr 2017 durchgeführt. Neben der üblichen Well-to-Wheel-Betrachtung werden auch die weiteren Lebenswegabschnitte der Herstellung, Entsorgung, Wartung von Fahrzeugen und Infrastruktur mit einbezogen. Zudem werden neben dem Energieverbrauch und den Treibhausgasen sowie den Luftschadstoffen auch weitere Indikatoren aufgenommen wie die Rohstoffnutzung oder die Flächenbelegung. Auf die Bewertung physikalischer Indikatoren zum Verkehrslärm wird wegen begrenzter Aussagefähigkeit verzichtet (siehe Kapitel 2.4.7). Das Thema Verkehrslärm wird aber mit einer punktuellen Vertiefung zu den Verkehrskosten im Straßenverkehr betrachtet (Siehe Kapitel 2.5.3). Die Status quo-Betrachtung ist auch Grundlage für die systemischen Betrachtungen in diesem Verkehrsartenvergleich, bei denen die Wirkungen von Veränderungen in der Verkehrsleistung untersucht werden.

Bei der **systemischen Betrachtung** werden die Auswirkungen von Veränderungen im gesamten Verkehrssystem analysiert. Im Verkehrsartenvergleich ist das primär die Auswirkung von geänderten oder verlagerten Verkehrsleistungen auf die ökologischen Belastungen. Aufbauend auf einer Status quo-Situation werden also dynamische Änderungen untersucht. Dabei werden die Änderungen der Verkehrsleistung der relevanten Verkehrsarten, insbesondere die Verlagerung zwischen den Verkehrsarten oder Verkehrsmitteln sowie induzierte Verkehre einbezogen. Wichtig ist dabei die Wahl der richtigen Systemgrenze, um alle relevanten Veränderungen miteinzubeziehen. So ist es z. B. oftmals notwendig auch den Vor- und Nachlauf einer bestimmten Fahrt oder gleich ganze Wegeketten zu analysieren. Im Rahmen dieses Verkehrsartenvergleichs werden systemische Bilanzierungen anhand verschiedener

Betrachtungsfälle durchgeführt und diskutiert. Der Fokus liegt dabei auf der Quantifizierung der Wirkungen von Verlagerungspotenzialen auf ökologisch günstigere Verkehrsträger. Systemische Änderungen können auch Auswirkungen auf andere Lebenswegabschnitte haben (z. B. Energiebereitstellung oder Infrastruktur), die, sofern sie relevant sind, ebenfalls mitbetrachtet werden müssen.

2.2.4 Systemgrenzen

Bei diesem Verkehrsartenvergleich wird der inländische Personen- und Güterverkehr betrachtet. Beim Flugverkehr erfolgt eine Unterscheidung in den nationalen Verkehr innerhalb Deutschlands und den von deutschen Flughäfen abgehenden Verkehr bis zur ersten Landung auf dem Auslandsflughafen. Einbezogen werden die am häufigsten in Deutschland benutzten Verkehrsarten.

Berücksichtigt wird dabei der gesamte Lebensweg der Fahrzeuge von der Herstellung über die Nutzung bis zu ihrer Entsorgung. Folgende **Lebenswegabschnitte** werden bilanziert:

- ▶ Nutzungsphase (Fahrzeugbetrieb)
- ▶ Energiebereitstellung von Kraftstoffen und Strom
- ▶ Herstellung, Wartung und Entsorgung der Fahrzeuge
- ▶ Bau, Unterhalt und Betrieb der benötigten Verkehrsinfrastruktur

Damit geht diese Studie im Verkehrsartenvergleich deutlich über die derzeit meist üblichen Well-to-Wheel-Betrachtungen (z. B. der EN 16258) hinaus.

Die Begrifflichkeiten für die Beschreibung des Verkehrs sind nicht einheitlich und werden daher für diese Studie wie nachfolgend beschrieben festgelegt: Der Oberbegriff **Verkehrsträger** bezieht sich beim Verkehrsartenvergleich auf die für die Transporte verwendeten Verkehrswege Straße, Schiene, Wasserstraße, Luft. Des Weiteren wird nach den **Transportarten** Personen- und Güterverkehr unterschieden. Die **Verkehrsart** ist der Oberbegriff für verschiedene Formen der Mobilität, wie sie auch in der Mobilitätsforschung oder Verkehrsstatistik verwendet werden und für diesen Verkehrsartenvergleich weiter spezifiziert wurden. Das **Verkehrsmittel** beschreibt schließlich die für den Transport verwendete Fahrzeugart.

Die folgende Tabelle 4 gibt einen Überblick über die verwendeten Begrifflichkeiten und die in diesem Verkehrsartenvergleich betrachteten Verkehrsarten und Verkehrsmittel.

Tabelle 4: Betrachtete Verkehre im Verkehrsartenvergleich

Oberbegriff	Inhalt
Verkehrsträger	Straße, Schiene, Wasser, Luft
Transportart	Personenverkehr, Güterverkehr
Verkehrsart	Fußverkehr, Radverkehr, MIV, Car Sharing, ÖPV-Straße, ÖPV-Schiene, unterteilt in Schienenpersonennahverkehr (SPNV) und Schienenpersonenfernverkehr (SPFV), Fernlinienbusverkehr, Reisebusverkehr, Straßengüterverkehr, Eisenbahngüterverkehr, Binnenschifffahrt (Güter), Flugverkehr (Güter und Personen)

Oberbegriff	Inhalt
Verkehrsmittel	Zu Fuß, Fahrrad, Pedelec, Pkw, Kraftrad (KR), Kleinkraftrad (KKR), Linienbus im Nah- und Regionalverkehr, Linienbus im Fernverkehr, Reisebus, Straßen-, Stadt- und U-Bahn (SSU), Fernverkehrszug, Nahverkehrszug, Lastenrad, leichte Nutzfahrzeuge (LNF), Lkw, Last-/Sattelzug, Güterzug, Binnengüterschiff, Flugzeug

Eine Vergleichbarkeit der Verkehrsarten ist nur gegeben, wenn sie für den gewünschten Mobilitätszweck geeignet sind. Zu diesem Zweck werden vier **Betrachtungsräume** definiert, die gleichzeitig für **typische Wegdistanzen** stehen. Für den Personen- und Güterverkehr gelten verschiedene Abgrenzungen. Die hier verwendeten Abgrenzungen sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Betrachtungsräume und zugehörige Distanzklassen des Verkehrsartenvergleichs

Betrachtungsraum Transportart	Nahverkehr Agglomeration	Nahverkehr Ländlicher Raum	Regionalverkehr	Fernverkehr
Personenverkehr	Alltagsverkehr innerhalb einer Agglomeration/verstädterter Raum oder ins unmittelbare Umland bis 15 km	Alltagsverkehr im ländlichen Raum bis 15 km	Wege zwischen 15 und 100 km in der Region	Wege über 100 km sowohl im Alltags- als auch im Gelegenheitsverkehr
Güterverkehr	Güterfeinverteilung in der Agglomeration (Last/First Mile) bis 15 km	Güterfeinverteilung im ländlichen Raum, regionale Wert-schöpfungsketten bis 15 km	Regionaler Verteilverkehr zwischen 15 und 150 km	Gütertransport über 150 km

Die Verkehrsarten lassen sich damit den Betrachtungsräumen zuordnen, in denen sie typischerweise vorkommen und dementsprechend sinnvoll hinsichtlich ihrer ökologischen Wirkungen vergleichbar sind. Allerdings konnten im Rahmen dieser Studie nicht die für den jeweiligen Betrachtungsraum typischen Randbedingungen (z. B. Art der Fahrzeuge, repräsentativer Flottenmix, Einsatzmuster, Auslastung) je Verkehrsart ermittelt werden, da entsprechende Informationen nicht vorlagen oder nur mit großem Aufwand hätten ermittelt werden können. Trotzdem ist die Aufteilung hilfreich bei der Bewertung der Umweltwirkungen der einzelnen Verkehrsmittel und insbesondere bei der systemischen Betrachtung konkreter Verkehre.

Die Zuordnung der Verkehrsarten zu Betrachtungsräumen ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Typische Verkehrsarten je Betrachtungsraum im Verkehrsartenvergleich

Betrachtungsraum Transportart	Nahverkehr Agglomeration	Nahverkehr Ländlicher Raum	Regionalverkehr	Fernverkehr
Personenverkehr	Fuß- und Radverkehr, MIV, Car Sharing, ÖPV, SPNV	Fuß- und Radverkehr, MIV, Car Sharing, ÖPV, SPNV	Radverkehr, MIV, Car Sharing, ÖPV, SPNV, SPFV	MIV, Car Sharing, Fernlinienbus, Reisebus, SPFV, Flugzeug

Betrachtungsraum Transportart	Nahverkehr Agglomeration	Nahverkehr Ländlicher Raum	Regionalverkehr	Fernverkehr
Güterverkehr	Lastenrad, LNF, Lkw, Last- /Sattelzug	Lastenrad, LNF, Lkw, Last- /Sattelzug	LNF, Lkw, Last- /Sattelzug, (SGV, Binnenschiff)	(LNF, Lkw), Last- /Sattelzug, SGV, Binnenschiff, Flugzeug

In Klammern: im Verkehrsartenvergleich nicht berücksichtigt

2.2.5 Bezugsgröße

Für die Bezugsgröße (für alle Umweltwirkungen) gibt es im Verkehrsbereich unterschiedliche Möglichkeiten. Eine wichtige Ebene ist der Bezug auf einen **Fahrzeugkilometer**, der Vergleiche zwischen verschiedenen Antriebstechnologien ansonsten gleichwertiger Verkehrsmittel ermöglicht, z. B. Diesel-Pkw vs. Batterie-elektrischer Pkw. Um den potenziellen Transportnutzen eines Verkehrsmittels abzubilden und Vergleiche zwischen den Verkehrsmitteln zu ziehen, bietet sich der Bezug auf die angebotene Transportkapazität, das ist im Personenverkehr der **Platzkilometer** und im Güterverkehr der **Kapazitäts-Tonnenkilometer**, an. Dieser Bezug ermöglicht eine Einordnung der theoretisch möglichen ökologischen Wirkung eines Verkehrsmittels – unabhängig von der konkreten Nutzung des Verkehrsmittels. Zur Bestimmung des konkreten Nutzens schließlich ist, unter Einbezug der mit dem Verkehrsmittel tatsächlich erbrachten Verkehrsleistung, die reale Auslastung zu berücksichtigen. Dafür sind geeignete Bezugsgrößen die Personenkilometer bzw. Tonnenkilometer.

Alle dargestellten Bezugsgrößen stehen miteinander in Beziehung: Mit der Kapazität des Fahrzeuges kommt man von den Fahrzeugkilometern zunächst auf die Platz- und angebotenen Tonnenkilometer, mit der durchschnittlichen Auslastung auf die Personen- oder Tonnenkilometer. Auf welche Bezugsgröße sich die ökologischen Vergleiche beziehen, hängt dabei (vor allem bei der systemischen Betrachtung) immer von der konkreten Fragestellung ab.

2.2.6 Multifunktionalität und Allokationsprinzipien

In der Umweltbilanzierung müssen alle in einem System entstehenden Umweltwirkungen dem Nutzen dieses System zugeteilt werden, damit eine Beziehung zur Bezugsgröße hergestellt werden kann. Dabei tritt oftmals der Fall auf, dass ein System mehr als eine Funktion erfüllt oder mehr als ein Produkt liefert (so genannte **Koppelprodukte**), also gleichzeitig und untrennbar mehrere Nutzen aufweist. In diesem Fall muss üblicherweise eine Allokation erfolgen, wenn eine Aussage zur Umweltwirkung nur einer dieser Nutzen (Funktionen/Produkte) alleine gemacht werden soll. Dabei gibt es nicht die eine objektiv richtige Art der Allokation, da eine Allokation immer subjektive Züge aufweisen wird. Sinnvoll ist die Orientierung an einem normativen Rahmen¹.

Die „Vereinfachte Umweltbewertung des Umweltbundesamtes“ (Verum) für den Umgang mit Multifunktionalitäten schlägt ein Vorgehen in Anlehnung an die ISO 14040/44 vor. Gemäß ISO 14040/44 ist eine Allokation, wenn immer möglich, zu vermeiden, indem der Gesamtprozess in Teilprozesse aufgeteilt wird. Ist dies nicht möglich, ist die zweite Wahl zum Umgang die Systemerweiterung, bei der versucht wird, den Aufwand für eines der beiden Koppelprodukte rechnerisch aus dem System zu entfernen. Dies wird, im Beispiel eines Prozesses mit insgesamt drei Produkten, erreicht indem zwei Prozesse gesucht werden, die jeweils nur eine der drei Funktionen erbringen. Der Aufwand für diese zwei Prozesse wird dann vom Gesamtaufwand des Koppelproduktsystems abgezogen, damit nur der Aufwand für das dritte Koppelprodukt

¹ Vergleiche dazu z. B. (Werner et al., 2007).

verbleibt. Als dritte Alternative schlägt ISO 14040 bzw. ISO 14044 eine Allokation auf Basis physikalischer Eigenschaften vor. Dabei können (und sollen) durchaus einzelne Aspekte des Systems nach unterschiedlichen Eigenschaften zugeordnet werden. Wenn keine sinnvolle physikalische Zuteilung möglich ist, können andere Kriterien, z. B. ökonomische, hinzugezogen werden.

Im Verkehrsartenvergleich treten **Multifunktionalitäten** vor allem im Bereich der Kraftstoff- und Fahrzeugherstellung sowie der Infrastruktur und ihrer Flächennutzung auf.

In der **Fahrzeugherstellung** tritt eine Multifunktionalität dann auf, wenn ein Fahrzeug sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr genutzt werden kann. Dies ist beim Flugverkehr der Fall, wo mit einem Flugzeug gleichzeitig Personen und Güter transportiert werden. Im Verkehrsartenvergleich wird hier jeweils mit einer Allokation gearbeitet, d. h. die Umweltwirkungen werden zwischen den verschiedenen Nutzungen aufgeteilt. Dabei wird für Flugzeuge mit dem Vorgehen aus der EN Norm 16258 gearbeitet (DIN, 2012). Diese Allokation basiert auf dem physikalischen Zusammenhang zwischen Energiebedarf des Flugzeuges und der Gesamtmasse. Konkret wird eine Umrechnung der Passagiere in Tonnenkilometer vorgenommen, indem pro Passagier (inklusive Gepäck) ein Gewicht von 0,1 t angesetzt wird. Anhand der Tonnenkilometer der transportierten Fracht und der transportierten Passagiere erfolgt dann eine Allokation der Umweltwirkungen zwischen den beiden Nutzungen. Ändert sich z. B. die Beladung (Tonnen) eines Flugzeuges bei gleichbleibender Passagierzahl, wird ein größerer Teil der Umweltwirkungen den Passagieren zugeordnet (oder umgekehrt bei sinkenden Passagierzahlen bzw. zunehmender Fracht). Im Allgemeinen führt diese Massenallokation dazu, dass relative große Teile der Umweltwirkungen im Flugverkehr auf die Fracht angerechnet werden. Eine Allokation nach ökonomischen Kriterien (z. B. Beitrag zum Umsatz oder Gewinnmarge) würde dem Personentransport deutlich höhere Lasten zuteilen.

Auch bei den Vorketten in der Kraftstoff- und Strombereitstellung treten Multifunktionalitäten auf. Die Stromvorketten stammen vom Umweltbundesamt und werden so auch in TREMOD verwendet. Grundsätzliches Vorgehen ist beim Strom eine Allokation zwischen Strom und Wärme nach der „finnischen Methode“. Das Vorgehen ist in (AGEB, 2015) beschrieben: hier wird die Aufteilung des Brennstoffeinsatzes zwischen Strom/Wärme mittels der Primärenergieeinsparung berechnet, indem ein Vergleich mit einem Referenzwirkungsgrad einer reinen Strombereitstellung (40 %) und einer reinen Wärmebereitstellung (80 %) angestellt wird. Die Vorketten der Raffinerieprodukte werden in (DLR et al., 2015) näher beschrieben und basieren auf einem Modell, wie es auch für die JEC WTW-Studie (JRC, 2011a) genutzt wurde. Hier wird ein Marginalansatz gewählt, um eine Allokation zu vermeiden.

Da die **Verkehrsinfrastruktur** (und damit auch deren Fläche) meist von unterschiedlichen Verkehrsträgern geteilt wird, muss auch hier mittels Allokation bestimmt werden, wie groß der Infrastruktur- und der Flächenbedarf für einen spezifischen Verkehrsträger ist. Dabei wird unterschieden zwischen der Allokation der Umweltwirkungen für die Infrastruktur (Kapitel 2.3.4) und der Allokation der Verkehrsflächen (Kapitel 2.4.5). Für beide wird das Vorgehen nachfolgend kurz beschrieben und später vertieft.

Der Aufwand zur Instandhaltung einer Fahrbahn hängt von deren Belastung durch die Fahrzeuge ab. Aufgrund der höheren Masse und Achslast trägt z. B. ein Lkw mehr zur Beschädigung der Fahrbahn bei als ein Pkw. Entsprechend kann der Aufwand zur Instandhaltung der Fahrbahn im Straßenverkehr nach (Brutto-)Masse bzw. Achslast und Nutzungshäufigkeit auf die verschiedenen Fahrzeuge verteilt werden. Die Allokation der Emissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur erfolgt daher nach (Mottschall/Bergmann 2013) wie folgt:

- ▶ Die berechneten Emissionen durch den Bau der gesamten Infrastruktur werden durch die Lebensdauer geteilt.
- ▶ Zu den so ermittelten baubedingten jährlichen Emissionen werden ggf. die durchschnittlich pro Jahr durch Unterhalt (Wartung) entstehenden Emissionen addiert.
- ▶ Die Aufteilung auf die Verkehrsarten erfolgt dann über die Brutto-Tonnenkilometer. Entsprechend dem Quotienten aus Brutto-Tonnenkilometer der jeweils betrachteten Verkehrsart und der Gesamtsumme der Brutto-Tonnenkilometer auf der Infrastruktur ergibt sich der Anteil der Emissionen, welcher der Verkehrsart zuzurechnen ist.
- ▶ Die so ermittelten Emissionen werden dann durch die jährlichen Verkehrsleistungen (Personen- oder Tonnenkilometer) der Verkehrsart geteilt; so also zum Beispiel die Emissionen, die auf die Fracht entfallen, durch die (Netto-)tkm des Güterverkehrs. Ergebnis sind Emissionen pro tkm bzw. Pkm, differenziert nach den Verkehrsarten.

Diese Allokation ergibt aus einer Ursache-Wirkungs-Logik aber keinen Sinn für die Aufteilung des Flächenbedarfs auf die Fahrzeugklassen, daher wird für diesen speziellen Fall folgende alternative Allokationsmethodik angewendet:

- ▶ Die Verkehrsinfrastruktur (im Folgenden am Beispiel einer Straße erklärt) hat mehrere Funktionen (Koppelprodukte), wie z. B. Bereitstellung von Fahrbahnen für Lkw, Pkw und Fahrräder. Eine Aufteilung in Teilprozesse ist hier jedoch nur möglich, wenn die Straße eine spezielle Fahrbahn für Fahrräder hat, die nur von Fahrrädern benutzt werden kann. Für Pkw und Lkw ist das im Allgemeinen nicht möglich, weil sie dieselbe Spur nutzen. Der Aufwand zur Bereitstellung dieser Straße (u. a. der Flächenbedarf) muss also auf die (im Beispiel drei unterschiedlichen) Funktionen mittels einer Allokation verteilt werden.
- ▶ Für die Allokation der Infrastrukturflächen von Verkehrsträgern (Straße, Schiene, Wasserstraße, Start- und Landebahnen) können prinzipiell zwei Fälle unterschieden werden, die unterschiedliche Allokationskriterien rechtfertigen: **frei fließender Verkehr** einerseits und **restriktiv geregelter Zugang** zur Verkehrsfläche (z. B. Schleusen an Flüssen oder Kanälen, Ampeln, Bahnsignaltechnik, Start- und Landeerlaubnisse nach Maßgabe der Flugsicherheit) andererseits. Parkflächen stellen einen dritten Fall dar, der wiederum nach anderen Kriterien verlangt.
- ▶ Auf Basis von der Länge oder der Standfläche von Fahrzeugen alleine lässt sich kein guter Allokationsfaktor für den Straßenflächenbedarf herleiten, weil die Fläche des Straßennetzes in Deutschland nicht von der Fahrzeuglänge determiniert wird, sondern eher von der Notwendigkeit Verbindungen zwischen stationären Infrastrukturen wie Wohnhäusern und Arbeitsstätten bereitzustellen. Hingegen hat die Fahrzeuglänge v. a. in Stausituationen durchaus einen Einfluss auf die maximale Kapazität von Straßen und kann somit zusammen mit der Verkehrsmenge Anlass zum Ausbau des Straßennetzes geben. Damit sind die Fahrzeuglängen und Fahrleistungen eine denkbare Basis für einen Allokationsfaktor für die Flächenumwandlung (siehe Kapitel 2.4.5).
In Situationen mit frei fließendem Verkehr sind zusätzlich zu den Fahrzeugabmessungen vor allem die vorgeschriebenen Sicherheitsabstände zwischen den Fahrzeugen relevant für den

Raumanspruch.

Beim restriktiv geregelten Zugang ist oft die maximal mögliche Anzahl von Fahrzeugen, die systembedingt pro Stunde oder Tag einen Streckenquerschnitt passieren können, begrenzt. Damit wird die Restriktion maßgeblich für die mögliche Fahrleistung auf den Abschnitten zwischen den Restriktionen und somit für den Flächenbedarf der Verkehre bzw. für die Kapazität des Verkehrssystems. Ein wichtiger Faktor sind auch die Fahrzeuglängen (bzw. Standflächen) für die benötigten Parkflächen. Hier stellt die Länge eine gute Basis für einen Allokationsfaktor dar.

In vielen Fällen wird eine physikalisch begründbare Zuteilung auf unterschiedliche Fahrzeuge möglich sein.

- ▶ Wenn keine sinnvolle physikalische Zuteilung möglich ist, können andere Kriterien (z. B. ökonomische) herangezogen werden. Ein Beispiel wo dies sinnvoll ist sind Forststraßen, die einerseits der Waldnutzung (Holztransporte) dienen, andererseits aber auch als Fuß- und Radwege vor allem eine Funktion als Erholungsraum bieten. In diesem Fall scheint es nicht möglich oder angebracht, eine Allokation auf Basis der zurückgelegten Strecken der verschiedenen Fahrzeuge (bzw. Transportarten) vorzunehmen, weil a) die Daten nicht verfügbar sind und b) kein kausaler Zusammenhang zur Straßenfläche besteht. Ein weiteres Beispiel sind Straßen in Siedlungen, für die überwiegend von einer Erschließungsfunktion auszugehen ist. Gemäß Erschließungsbeitragsrecht dienen Nebenstraßen zu 90 % der Erschließung (= prinzipielle Erreichbarkeit) und nur 10 % dem Verkehr (innerörtliche Hauptverkehrsstraßen zu 50 %). In beiden Fällen kann ein ökonomischer Ansatz (Wert der Erholungsfunktion gegenüber Ertrag aus Waldnutzung / Erschließungsbeiträge) sinnvoller sein.

2.3 Lebenswegabschnitte

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Lebenswegabschnitte charakterisiert und deren Einbeziehung in die ökologische Bilanzierung beschrieben.

2.3.1 Nutzungsphase

Als Nutzungsphase wird in diesem Vorhaben die Betriebsphase der Verkehrsmittel bezeichnet. Darin können auch Vorgänge zur Vorbereitung der Betriebsphase (z. B. Vorwärmen) bzw. zum Abstellen des Fahrzeugs am Ende der Fahrt oder auch Be- und Entladevorgänge enthalten sein. Die Nutzungsphase wird in ökologischen Bilanzierungen auch als „Tank-to-Wheel“ bezeichnet. Berücksichtigt werden dabei alle ökologisch relevanten Effekte, die ab Zapfsäule, Ladestation/ Steckdose oder Stromabnehmer (Pantograph) bis zur Umsetzung der Bewegung auftreten.

Relevante Größen der Nutzungsphase sind

- ▶ der (End-)Energieverbrauch des Fahrzeugs (inklusive der Ladeverluste bei Elektrofahrzeugen),
- ▶ die Klimagas- und Luftschadstoffemissionen durch die Verbrennungsmotoren,
- ▶ die Lärmemissionen durch Motoren, Wind- und Rollwiderstände und
- ▶ die beim Fahrzeugbetrieb verursachten Unfälle.

Die Nutzungsphase ist die zentrale Aktivität, mit welcher der primäre Nutzen des Verkehrs – nämlich der Transport von Personen und Gütern auf einer festgelegten Relation in einem bestimmten Zeitraum – realisiert wird.

Charakteristisch für die Nutzungsphase ist, dass deren Energieverbrauch, Emissionen und Unfälle direkt beim Fahrzeugbetrieb verursacht werden und sich damit zeitlich und räumlich dem erzielten Nutzen direkt zuordnen lassen. Ähnliches gilt auch für die temporäre Flächenbelegung der Fahrzeuge. Alle anderen Lebenswegabschnitte verursachen ihre Umweltbeeinflussungen dagegen zeitlich entweder vor oder nach der Nutzungsphase an vielen unterschiedlichen Orten, die oftmals nicht unmittelbar mit dem Transportvorgang in Beziehung stehen. Daher ist die Nutzungsphase (neben der Fahrzeugbereitstellung) der einzige Lebenswegabschnitt, bei dem die Umweltbeeinflussung direkt mit dem verkehrlichen Nutzen – nämlich der Verkehrsleistung – in Beziehung gesetzt werden kann. Bei allen anderen Lebenswegabschnitten müssen dagegen geeignete Verfahren für diese Zuordnung abgeleitet oder festgelegt werden.

In diesem Projekt werden die Kennzahlen für den Energieverbrauch sowie die Klimagas- und Luftschadstoffemissionen für die Nutzungsphase aus dem TREMOD-Modell übernommen (Knörr et al., 2016). Die Indikatoren für die Lärmbilanzierung werden in Kapitel 2.4.7 erläutert, das Vorgehen zur Bilanzierung der Verkehrsunfälle ist in Kapitel 2.4.6 beschrieben.

2.3.2 Energetische Vorketten

Neben der Nutzungsphase besonders relevant für die im Verkehrsartenvergleich betrachteten Umweltwirkungen des Verkehrs ist die Bereitstellung der benötigten Energie (also Kraftstoffe und Strom). Der Einbezug der energetischen Vorketten in die Gesamtbilanz wird heute in vielen Bilanzen (z. B. in TREMOD) bereits gemacht und bedeutet eine Erweiterung der Systemgrenze um den Well-to-Tank (WTT)-Teil der Prozesskette. In diesem werden alle Umweltwirkungen vom Rohstoffabbau bis zur Umwandlung in Kraftwerk/Raffinerie bis zum Transport zum Verbraucher abgebildet.

Für den Verkehrsartenvergleich werden die Vorkettendaten ebenfalls aus dem TREMOD-Modell entnommen (Knörr et al., 2016). Eine kurze Darstellung der Wirkungsindikatoren der Strom- und Kraftstoffbereitstellung wird in Tabelle 7 gezeigt.

Tabelle 7: Umweltwirkungen der energetischen Vorketten (Knörr et al., 2016)

	Strommix DE (2017)	Diesel/Kerosin	Benzin
Treibhausgase	552 g/kWh	16,223 g/MJ	14,629 g/MJ
CO	0,332 g/kWh	0,009 g/MJ	0,008 g/MJ
NMHC	0,022 g/kWh	0,026 g/MJ	0,054 g/MJ
NO _x	0,506 g/kWh	0,039 g/MJ	0,037 g/MJ
PM ₁₀	0,022 g/kWh	0,001 g/MJ	0,001 g/MJ
PM _{2.5}	nicht ausgewiesen	nicht ausgewiesen	nicht ausgewiesen
SO ₂	0,252 g/kWh	0,033 g/MJ	0,030 g/MJ
KEA*	nicht ausgewiesen	1,196 MJ/MJ	1,176 MJ/MJ

	Strommix DE (2017)	Diesel/Kerosin	Benzin
KRA**	0,889 kg/kWh	0,096 kg/MJ	0,064 kg/MJ

Anmerkungen: *KEA ist als WTW Faktor angegeben; ** Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) aus (Helms et al., 2016)

Grundsätzlich werden alle Energieträger zunächst bezogen auf den Energieinhalt (in MJ bzw. kWh), wobei die wichtigsten Daten zur Umrechnung der Kraftstoffmengen auf Kilogramm oder Liter ebenfalls in (Knörr et al., 2016) zu finden sind.

Die energetischen Vorketten werden dabei zunächst für alle Betrachtungsebenen verwendet, eine Diskussion der möglicherweise auftretenden Effekte bei der systemischen Betrachtung findet sich jedoch im Kapitel 3.4.2.

2.3.3 Fahrzeugherstellung, -wartung und -entsorgung

Ebenfalls in den Verkehrsartenvergleich aufgenommen werden die Umweltwirkungen der Fahrzeugbereitstellung. Hierzu zählen die Aufwendungen für die Herstellung der Fahrzeuge (Materialaufwendungen und Herstellungsprozesse) sowie die Fahrzeugwartung und die Fahrzeugentsorgung am Lebensende. Bilanziert werden dabei sowohl die Straßenfahrzeuge (Zweiräder, Pkw, Busse, schwere und leichte Nutzfahrzeuge) als auch die anderen Verkehrsmittel (Bahnen, Schiffe und Flugzeuge).

Die Modellierung der Fahrzeugherstellung, Wartung und Entsorgung erfolgte in der Software umberto LCA+ und als Hintergrunddatenbank wurde ecoinvent (Version 3.5 cut-off Systemmodell) genutzt.

Die ecoinvent Datenbank ist eine international anerkannte und oft genutzte Ökobilanzdatenbank, welche für alle benötigten (Material-)Vorketten transparente, gut dokumentierte und von unabhängigen Experten geprüfte Datensätze liefert. Verwendet wurde dabei für die Entsorgung ein sogenannter „cut-off Ansatz“. Dies bedeutet, dass zur Herstellung eines Produktes die genutzten primären Materialien voll angerechnet werden. Wenn bei der Entsorgung nutzbare Sekundärmaterialien anfallen, gibt es keine Gutschriften für diese. Im Gegenzug haben die im Produkt genutzten Sekundärmaterialien nur sehr geringe Lasten, da sie lediglich die Aufbereitung des Recyclingmaterials tragen müssen.

Im Gegensatz zu GEMIS liefert ecoinvent deutlich mehr Ökobilanzdatensätze, auf die aufgebaut werden konnte, speziell im Bereich vieler Infrastruktur- und Materialprozesse arbeitet GEMIS mit Proxydaten. Zudem ist auch das externe Review der ecoinvent-Datensätze deutlich aufwändiger als das von GEMIS, so dass die Qualität vieler Datensätze höher liegt.

Für einige dieser Verkehrsmittel konnten direkt Angaben aus der ecoinvent-Datenbank übernommen werden, für andere Verkehrsmittel mussten gegenüber den ecoinvent-Daten Anpassungen vorgenommen werden, um die im Verkehrsartenvergleich abgeleiteten Fahrzeugeigenschaften (z. B. das Leergewicht der Fahrzeuge) zu berücksichtigen.

Eine eigene Modellierung ist insbesondere für die Straßenfahrzeuge erfolgt, die sich auf vorherigen Arbeiten für andere ifeu-Studien stützt. Schwere Nutzfahrzeuge mit verschiedenen Antriebsarten sowie Schienenfahrzeuge wurden für Renewability III (teilweise ebenfalls basierend auf ecoinvent-Daten) bereits selber modelliert (Zimmer et al., 2016). Die Herstellung der leichten Nutzfahrzeuge und Personenkraftwagen stammt aus (Helms et al., 2016) bzw. aus

(Helms et al., 2019). Insbesondere wurde hier die Herstellung der Lithium-Ionen-Akkus überarbeitet und aktualisiert.

Alle verwendeten Hintergrunddaten (z. B. für die Materialbereitstellung) stammen direkt aus der aktuellsten ecoinvent-Version 3.5. Ebenso wurde auch die Fahrzeugwartung aus ecoinvent 3.5 übernommen.

Für die Ermittlung des kumulierten Rohstoffaufwands wurde das Modell „TREMOD materials“ genutzt. Hier sind jeweils für alle Fahrzeuge die Materialzusammensetzungen hinterlegt, anhand derer wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben der KRA berechnet werden kann.

Die Zuordnung der Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung und -entsorgung auf den Transportvorgang erfolgt zunächst auf Fahrzeugebene, d. h. pro individuellem Fahrzeug und wird dann anhand der Lebensfahrleistung der Fahrzeuge auf den Fahrzeugkilometer umgelegt. Die so ermittelten Umweltwirkungen von Fahrzeugherstellung und -entsorgung werden mit den kilometerbezogenen Wartungsaufwendungen im Verkehrsartenvergleich zusammen ausgewiesen und können je nach Betrachtungsebene bzw. Fragestellung wie die Umweltwirkungen der Nutzungsphase auf die Kapazitäts-Kilometer oder die Verkehrsleistungen bezogen werden. Die grundsätzlichen Fahrzeugeigenschaften und auch ihre Herstellung, Entsorgung und Wartung bleiben dabei für alle Betrachtungsebenen gleich.

Dabei wird bei allen Fahrzeugen von der Lebensdauer in Deutschland ausgegangen. Die Umlage der Fahrzeugherstellung stellt also eher eine obere Abschätzung dar, da die Fahrzeuge unter Umständen im Anschluss noch ein „zweites Leben“ im Ausland führen. Gerade im Bereich der Personenkraftwagen werden sehr viele Fahrzeuge zwar abgemeldet, aber nicht in Deutschland entsorgt. Diese Fahrzeuge werden dann oft in Drittländer weiterverkauft, wo sie noch länger gefahren werden. Es gibt jedoch keine verlässlichen Statistiken, welche die mittlere Lebensdauer dieser Fahrzeuge abbilden, daher wird davon ausgegangen, dass die vollen Lasten der Fahrzeugherstellung den Erstnutzern in Deutschland anzulasten sind.

2.3.4 Infrastrukturbereitstellung, -betrieb, -unterhalt und -entsorgung

Ebenso wie die Betrachtung der fahrzeugseitigen Aufwendungen werden die Umweltwirkungen von Bau, Betrieb, Unterhalt und Entsorgung der Verkehrsinfrastrukturen in dem Verkehrsartenvergleich mitbetrachtet. Hierzu zählen die Infrastrukturen für Straßen-, Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr.

Erfassung und Bewertung der Materialströme

Für die Bewertung der Straßeninfrastrukturen wird auf eine Datenbank aus (Knappe et al., 2015) zurückgegriffen. Die Erhebung des Status quo für die Datenbank der Straßeninfrastrukturen erfolgt differenziert nach einzelnen Kreisen und kreisfreien Städten und erreicht somit einen sehr großen Detaillierungsgrad. Es wird eine Auswertung der ATKIS-Basis-DLM-Datensätze (Datenlieferung von 03/2014) vorgenommen um das Netz mit Längen und Flächen zu erfassen. Mit einer Datenerhebung bei den Straßeninformationsbanken der Länder und einer extensiven Umfrage bei Städten und Gemeinden werden diese Daten plausibilisiert und mit Informationen zu den Straßenkörpern, sowie den Straßenbauwerken und regionalen Merkmalen erweitert, um die Massenströme zu ermitteln.

Die Daten werden dann auf das Bezugsjahr 2017 aktualisiert. Dabei werden die Daten zu den Bundesfernstraßen, Landes- und Kreisstraßen aus Verkehr in Zahlen (Radke, 2018) übernommen, wobei die Zahlen für 2017 vorläufig sind. Für die Gemeindestraßen werden analog zu dem Vorgehen in (Knappe et al., 2015) über den Flächenzuwachs der Siedlungs-, und Verkehrsflächen die Verkehrsflächen bestimmt. Abzüglich der Entwicklung bei den Landes- und

Kreisstraßen ergibt sich somit die Fläche und Länge der Gemeindestraßen. In der aktuellen Ausgabe von „Verkehr in Zahlen“ (Radke, 2018) sind zwar Angaben für die Gemeindestraßen hinterlegt, diese umfassen jedoch auch nicht (mehr) in Gemeindelast stehende Wege, welche grundsätzlich andere Zusammensetzungen haben. Zudem ist auch die Instandhaltung der Wege meist nicht geregelt und aufgrund mangelnder Zuständigkeit auch häufig vernachlässigt. Zuletzt wird diesen Wegen auch keine für den allgemeinen Verkehr wichtige Funktion mehr zugeordnet. Daher werden diese Strecken nicht berücksichtigt.

Für die Schienen-, Schiff- und Luftverkehrsinfrastrukturen werden Daten aus (Mottschall/Bergmann 2013) sowie (Trapp et al., 2017) genutzt. Für das Schienennetz steht ein sehr detaillierter Datensatz der DB AG zur Verfügung, in dem die Gleise nach verschiedenen Schienen-, Bettungstypen, etc. aufgelistet sind. Für die Binnenschifffahrt stammt ein Großteil der Netzdaten von Daten der Wasserstraßen und Schifffahrtsverwaltung des Bundes WSV (Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), 2011) als auch von KartAL 2 (Steger et al., 2011).

Die so ermittelten, jährlich anfallenden Stoffströme werden dann mit Daten aus der ecoinvent-Datenbank 3.5 verknüpft, um die Umweltwirkungen zu ermitteln. Hier ist hervorzuheben, dass sich durch die aktualisierten Faktoren einige kleine Änderungen bei der Gesamtbewertung ergeben, welche im großen Bild nicht großartig ins Gewicht fallen. Eine Änderung macht sich jedoch massiv bemerkbar. Mit dem Update der Faktoren aus ecoinvent 3.5 sinken die THG-Emissionen der Asphaltherstellung von knapp 200 kg CO₂-eq pro Tonne Asphalt auf knapp 50. Eine Reduktion auf 25 % der ursprünglichen Wirkung. Da Asphalt eine tragende Rolle bei den Umweltwirkungen des Straßenverkehrs hat wirkt sich diese Änderung auf den absoluten und spezifischen Beitrag der Infrastrukturemissionen stark aus.²

Allokation der Materialströme und Energiebedarfe

Die Allokation der THG-Emissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur lehnt sich in der vorliegenden Studie für den Schienen- und Straßenverkehr sowie die Binnenschifffahrt an die PCR for Railways (PCR, 2009) an.

Das grundlegende Verfahren zur Allokation wird in Kapitel 2.2.6 beschrieben. Der dritte Schritt des Vorgehens, die Allokation der Gesamtemissionen auf die verschiedenen Verkehrsarten (z. B. Fracht und Personenverkehr) wird für die unterschiedlichen Verkehrsträger nochmals kurz beleuchtet, da an dieser Stelle einerseits Unterschiede zwischen den Verkehrsmitteln bestehen – und damit teilweise von dem in der PCR for Railways (PCR, 2009) beschriebenem Vorgehen abweichen – und es sich andererseits um einen wesentlichen Aspekt handelt.

Das Vorgehen beim **Schiienenverkehr** wird ausführlich in (Schmied et al., 2013) beschrieben. Die Allokation basiert auf einem Datensatz der DB AG in dem die Zugbelegung der einzelnen Streckenabschnitte dokumentiert und aufbereitet wurde. Damit kann eine Allokation für jeden einzelnen Streckenabschnitt und den verschiedenen Verkehrsarten durchgeführt werden. Die Datenbank basiert auf Daten aus dem Jahr 2009, eine Aktualisierung der Daten liegt nicht vor. Daher muss dieses Projekt auf den Daten von 2009 aufsetzen. Die Daten beinhalten eine trassengenaue Aufteilung der Bruttotonnenkilometer für die verschiedenen Verkehrsarten. Über die geleisteten Bruttotonnenkilometer der verschiedenen Verkehrsträger auf den Abschnitten werden die Materialaufwendungen der Infrastruktur auf die Verkehrsarten umgelegt. Vor dem Hintergrund, dass in den letzten zehn Jahren keine große Verschiebung zwischen den Verkehrsarten (Modal Split) stattgefunden hat, wird der Verteilungsschlüssel gleichbleibend

² Bzw. in den Vorgängerstudien hatte. Asphalt machte rund 50 % der Gesamtemissionen der Straßeninfrastruktur aus.

weiter genutzt. Der Energiebedarf der Infrastruktur wird äquivalent zu (Schmied et al., 2013) gehandhabt. Hier erfolgte die Aufteilung auf die Verkehrsträger anhand DB-Angaben.

Die Aufwendungen im **Straßenverkehr** werden in Anlehnung an die Wegekostenrechnung des DIW verteilt, mit dem auch die Mautkosten in Deutschland berechnet werden (Korn et al., 2018). Dabei wird eine Mischung aus gewichts- und kapazitätsabhängigen Kosten verwendet. Die Zuordnung erfolgt hier so genau wie es das Stoffstrommodell aus (Knappe et al., 2015) in Kombination mit vorliegenden Daten zur Verteilung der Fahrzeugkilometer zulässt. Dies unterscheidet sich hinsichtlich der Verkehrsarten und Straßenkategorien. Weiterhin werden für Innerortsstraßen sechs Prozent der Umweltwirkungen verkehrsfremden Nutzen angerechnet und fallen somit aus der Allokation heraus. Den Straßen außerorts wird kein verkehrsfremder Nutzen zugerechnet (Link et al., 2009). Der Energieverbrauch wird äquivalent zu (Mottschall/Bergmann 2013) auf die Verkehrsarten verteilt.

Die wichtigste Frage beim **Binnenschiffsverkehr** ist die Zuteilung der verkehrsfremden Funktionen, da hier nur die Güterverkehre offiziell erfasst und somit auch bewertet werden können. Der Vorläufer dieser Studie, in dem die ökonomischen Belange der Verkehrsarten betrachtet wurden hat sich auf verkehrsfremde Funktionen von 42 % festgelegt (Bruns et al., 2018). Die verbleibenden 58 % werden dem Güterverkehr in der Binnenschiffahrt angerechnet.

Im **Luftverkehr** erfolgt die Allokation nach (Mottschall/Bergmann 2013) nicht auf Basis der Brutto-tkm. Dieses Vorgehen ist ungeeignet, da z. B. Langstreckenflüge einen überproportionalen Anteil an den Gesamtemissionen tragen würden. Hier ist die Belastung der Infrastruktur nur an Start- und Landepunkt gekoppelt. Eine weitere denkbare Möglichkeit, die Emissionen durch Bau, Unterhalt und Betrieb der Infrastruktur (Flughäfen) zu allokieren, wäre die Anzahl der Flugbewegungen. Da auf den kürzeren Flügen jedoch tendenziell kleinere Flugzeuge als auf Langstrecken eingesetzt werden, würde auch dieses Vorgehen zu einer Diskriminierung führen. In diesem Fall würde den Kurzstrecken ein zu hoher Anteil an den Gesamtemissionen zugerechnet.

Zudem ist die Trennung zwischen Passage (Passagiertransport) und Fracht beim Luftverkehr nicht so einfach abzugrenzen wie beim Straßen- oder Schienenverkehr, da auch in Passagiermaschinen Güter als Beifracht (Belly-Freight) transportiert werden. Aus diesen Gründen wurde die Allokation in (Mottschall/Bergmann 2013) auf Basis der transportierten Verkehrseinheiten vorgenommen. Hier werden bei der Verteilung auf Passage und Fracht die Pkm mit dem Faktor 0,1 multipliziert. Dahinter steckt die Annahme, dass eine Person mit Gepäck rund 100 kg wiegt, bei der Betrachtung des transportierten Gesamtgewichts also zehn Personen einer Tonne Fracht entsprechen.

Bezüglich der Infrastrukturaufwendungen werden nur die in der Verkehrsstatistik des statistischen Bundesamtes ausgewählten Flugplätze gezählt. Somit wird vermieden kleinere Flugplätze, deren Verkehre nicht erfasst werden auf die erfassten Verkehre zu zählen und verkehrsfremde Nutzen müssen nicht berücksichtigt werden.

Die Studie sollte ursprünglich auch die Infrastrukturbeiträge beim Fuß- und Fahrradverkehr untersuchen. Bei der Erhebung der Infrastrukturen von Geh- und Radwegen ergaben sich jedoch größere Hürden, weshalb im Projektverlauf entschieden wurde diese Infrastrukturen nicht mit zu erfassen. Bei dem Radverkehr werden Umweltwirkungen anhand der Allokationsverfahren im Straßenverkehr zugeteilt. Diese fallen jedoch sehr gering aus.

Da es nur vereinzelt kommunale Erhebungen der Flächen oder Längen von Fuß- und Radwegen gibt war eine Erfassung der Materialmengen über Statistiken nicht möglich. Eine grobe Aufstellung der verbauten Materialien in Fußwegen wäre über Indikatoren der

Quartiersplanung und einigen Studien möglich gewesen. Hier sind jedoch Radwege nicht separat erfasst. Es hätte also einer (recht willkürlichen) Zuordnung der Fußgängerflächen auf den Fuß- und Radverkehr bedurft. Weiterhin gibt es keine Zahlen zu den Lebensdauern und Erhaltungszyklen der Infrastrukturen. Insbesondere von den Gemeindestraßen ist bekannt, dass die realen Lebensdauern weit von denen in den Afa-Tabellen abweichen, daher wäre dies auch kein geeigneter Indikator. Auch hier hätte entweder eine extensive Erhebung, oder eine Zuweisung stattfinden müssen. Als letzten wichtigen Punkt ist die Zuordnung des verkehrsfremden Nutzens (Anteil Fußgängerverkehr) unklar. Aus diesen vielen Unsicherheiten ergab sich die Entscheidung die Fuß- und Radinfrastrukturen in der Studie nicht zu erheben. Eine Erhebung in einer gesonderten Studie erscheint jedoch wichtig und sinnvoll.

2.4 Wirkungskategorien

Aktuell ist der Verkehrssektor für eine Reihe an Umweltwirkungen verantwortlich, von denen die wichtigsten im Verkehrsartenvergleich dargestellt werden sollen. Folgende **Wirkungskategorien** werden dafür ausgewertet:

- ▶ Kumulierter Energieaufwand (KEA)
- ▶ Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)
- ▶ Treibhausgasemissionen
- ▶ Luftschadstoffe: Kohlenmonoxid, Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe, Stickoxide, Schwefeldioxid und Feinstaub (PM_{2,5} sowie PM₁₀)
- ▶ Flächenbelegung

Neben diesen klassischen Wirkungsindikatoren werden im Verkehrsartenvergleich zusätzlich auch die Lärmemissionen sowie Verkehrsunfälle und externe Kosten betrachtet.

Für den Verkehrsartenvergleich werden sowohl regionale oder lokale als auch globale Wirkungskategorien ausgewertet. Einzelkomponenten werden dabei allerdings nur teilweise zu den Wirkungskategorien zusammengefasst.

Tabelle 8: Überblick über die Wirkungskategorien

Wirkungskategorie	Räumliche Relevanz	Betrachtete Indikatoren
Ressourcenverbrauch	global	Kumulierter Energieaufwand (KEA) Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)
Treibhauseffekt	global	Treibhausgase (CO ₂ , CH ₄ , CO und N ₂ O) zusätzliche Klimawirkung Flugverkehr (EWF) v. a. durch Wasserdampf, Stickoxide (NO _x), Partikel (PM ₁₀ und PM _{2,5}) und Schwefeldioxid (SO ₂)
Eutrophierung	regional	Stickoxide (NO _x)
Sommersmog	regional	Stickoxide (NO _x) sowie Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC)
Versauerung	regional	Schwefeldioxid (SO ₂) sowie Stickoxide (NO _x)
Anorganische Substanzen und	lokal	Partikel (PM ₁₀ und PM _{2,5})

Wirkungskategorie	Räumliche Relevanz	Betrachtete Indikatoren
Auswirkungen auf die Atemwege		
Lärmbelastung	lokal	-
Flächenbelegung	lokal	Landnutzung/Landnutzungsänderung

Während der Energiebedarf, Rohstoffaufwand und der Treibhausgaseffekt global wirksam sind und anhand in der Ökobilanz etablierten Wirkungsabschätzungsmethoden charakterisiert werden, wirken sich die meisten Luftschadstoffe regional oder lokal aus. Im vorliegenden Verkehrsartenvergleich werden ausgewählte Einzelkomponenten der betrachteten Indikatoren ohne räumliche Zuordnung quantifiziert und ausgewiesen.

Auf eine Zusammenfassung zu den verschiedenen Wirkungskategorien wird verzichtet (siehe Kapitel 2.4.4). Der Vorteil dieses Vorgehens liegt einerseits in der größeren Robustheit der Daten und andererseits in der leichteren Sichtbarkeit der für die Fahrzeugnutzung besonders relevanten Schadstoffe wie z. B. Stickoxide oder Feinstaub und deren lokalen Wirkungen auf die (städtische) Luftqualität. Lediglich der Treibhauseffekt wird als CO₂-Äquivalent nach IPCC-Methodik zusätzlich zu den Einzelkomponenten dargestellt (siehe Kapitel 2.4.3).

2.4.1 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Betrachtet werden der Endenergieverbrauch während der Nutzungsphase sowie der zusätzliche Energieaufwand für die Bereitstellung der Kraftstoffe, Fahrzeugmaterialien und die Verkehrsinfrastruktur sowie deren Unterhaltung und Entsorgung. Berechnet wird dabei jeweils der gesamte kumulierte Energieaufwand (KEA).

Dabei enthält der kumulierte Energieaufwand nicht nur die direkt genutzte Energie für die Herstellung eines Produktes oder die Erbringung einer Dienstleistung, sondern auch die im Produkt gespeicherte Energie. Genutzt wird der obere Heizwert der fossilen und biotischen Brennstoffe um den KEA zu berechnen. Neben den fossilen Energieträgern sowie Biomasse haben auch erneuerbare Energien bzw. Kernkraft einen KEA zugewiesen bekommen. Der KEA von Wind, Sonne oder Wasserkraft wird dabei auf 1 gesetzt. Um auch einen KEA für Kernkraft ausweisen zu können, wird hier die Effizienz eines typischen Kernreaktors berechnet und ein (fiktiver) KEA für Uran ausgewiesen (Hischier et al., 2010).

2.4.2 Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)

Der Kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) wird definiert als die Summe aller in ein System eingehenden Rohstoffe – außer Wasser und Luft – ausgedrückt in Gewichtseinheiten. Er summiert alle entlang des Lebensweges eines Produktes benötigten Materialien (biotisch und abiotisch) auf, ohne eine Gewichtung anhand von Rohstoffverfügbarkeiten vorzunehmen. Angesetzt wird jeweils die genutzte Rohstoffentnahme, das heißt z. B. bei metallischen Rohstoffen die abgebauten Erzmengen (ohne den Abraum). Wichtig ist daher insbesondere der Metallgehalt im Erz.

Bisher ist der kumulierte Rohstoffaufwand nicht in den gängigen Ökobilanzdatenbanken enthalten, daher wurde ein vereinfachtes Vorgehen zur KRA-Berechnung anhand der Materialmengen gewählt. Zunächst wurden die in der Infrastruktur und den Fahrzeugen enthaltenen Materialmengen ermittelt und anhand von fertigen, mittleren KRA-Faktoren für die

Materialien gewichtet und verrechnet. Auch für die im Fahrzeugbetrieb verwendeten Kraftstoffe sowie Strom wurde ein KRA hinterlegt.

Die verwendeten Faktoren für den KRA stammen dabei größtenteils aus (Giegrich et al. 2012) und wurden ergänzt durch Angaben zum KRA der Strombereitstellung aus (Helms et al., 2016). Diese Faktoren enthalten auch bereits Angaben zu den Sekundäranteilen in den Materialien.

Ausgegeben wird neben dem gesamten kumulierten Rohstoffaufwand auch der KRA fossil, KRA metallisch, KRA mineralisch und KRA biotisch. Mengenmäßig dominiert in den meisten Fällen der mineralische KRA (durch die Infrastruktur), so dass diese Differenzierung hilfreich ist, um metallische oder andere Rohstoffe getrennt auszuwerten. Eine Auflistung aller verwendeter KRA-Faktoren befindet sich im Anhang.

2.4.3 Treibhausgasemissionen

Durch die Verbrennung von fossilen Rohstoffen werden Treibhausgase emittiert, entsprechend steigt ihre Konzentration in der Atmosphäre. Dadurch kommt es zu einer Verstärkung des Treibhauseffekts und in Folge zu einer Erwärmung der Erdoberfläche mit der Gefahr weitreichender globaler Klimaveränderungen. Wichtige Treibhausgase sind Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O), FCKW und Wasserdampf. Im Verkehr ist hauptsächlich CO₂ von Bedeutung, FCKW spielen im Verkehr (außer bei den hier nicht betrachteten Kühlmittelleckagen) nur eine untergeordnete Rolle und werden nicht weiter betrachtet.

Beim Flugverkehr gibt es neben den Treibhausgasemissionen noch einen weiteren Effekt, der zur Klimawirkung beiträgt und hier ebenfalls berücksichtigt wird. Bei Flugzeugen trägt auch der Ausstoß von Wasserdampf, Partikeln und Schwefel- sowie Stickoxiden in der oberen Atmosphäre zur Erwärmung des Klimas bei. Die genaue Höhe dieser zusätzlichen Klimawirkung ist nach aktuellem Wissenstand schwer zu quantifizieren, da sie vom Wetter, der Sonneneinstrahlung und der Hintergrundkonzentration einiger Substanzen abhängig ist. Während bei inländischen Flügen die zusätzliche Klimawirkung des Flugverkehrs (berechnet über den EWF = emission weighting factor) gering ausfällt, kann dieser Effekt bei längeren Flügen mehr als eine Verdoppelung der direkten Treibhausgasemissionen zur Folge haben. Trotz der Unsicherheiten in der genauen Höhe werden diese zusätzlichen Klimawirkungen des Flugverkehrs analog zum Vorgehen in TREMOD berücksichtigt.

In diesem Verkehrsartenvergleich werden somit die für den Verkehr relevanten Treibhausgase Kohlenstoffdioxid, Methan und Lachgas bilanziert und mit weiteren Treibhausgasen zusammengefasst als Treibhausgaspotenzial. Derzeit am gebräuchlichsten ist die Berechnung des Treibhausgaspotenzials mit dem Zeithorizont 100 Jahre (GWP 100) nach den Angaben des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Diese Faktoren werden regelmäßig aktualisiert (zuletzt im Jahr 2013). Im Verkehrsartenvergleich werden sowohl die älteren, aber noch sehr oft gebrauchten, Faktoren nach (IPCC, 2007) sowie die aktuellen nach (IPCC, 2013) ausgewertet.

Tabelle 9: Treibhausgaspotenzial (GWP 100) nach IPCC

Treibhausgas	CO ₂ -Äquivalente nach IPCC 2007	CO ₂ -Äquivalente nach IPCC 2013
Kohlenstoffdioxid (fossil)	1	1
Kohlenmonoxid (fossil)	1,57	4,06
Methan (fossil)	25	29,7
Lachgas	298	264,8

2.4.4 Luftschadstoffemissionen

Als Luftschadstoffe bezeichnet man staub- und gasförmige Emissionen, welche direkt zu Schädigungen der Umwelt oder des menschlichen Organismus führen können. Ihre Wirkung hängt nicht nur von der emittierten Menge ab, sondern vor allem von ihrer Verteilung in der Atmosphäre und damit der Konzentration am Ort der Immission. Entsprechend groß ist daher die regionale und lokale Bedeutung der Emissionen von Luftschadstoffen, gegenüber der globalen Bedeutung bei Treibhausgasen. Relevante Komponenten bei verkehrsbedingten Luftschadstoffemissionen sind Kohlenmonoxid, Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe, Stickstoffoxide, Schwefeldioxid sowie Feinstaub.

Kohlenmonoxid (CO)

Kohlenmonoxid entsteht durch unvollständige Verbrennung und damit bei nicht optimalen Betriebsbedingungen des Motors wie beispielsweise im Stau. Mit zunehmender Entfernung von der Quelle fallen die Konzentrationen von CO schnell ab, da es in der Luft direkt zu CO₂ oxidiert wird. Hauptemittent von CO ist der Straßenverkehr, insbesondere ältere Fahrzeuge mit Ottomotor ohne geregelten Dreiwege-Katalysator. Kohlenmonoxid ist ein starkes Atemgift, es beeinträchtigt den Sauerstofftransport im menschlichen Körper und kann bei sehr hohen Konzentrationen zum Erstickungstod führen.

Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC)

Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe umfassen eine Vielzahl leichtflüchtiger organischer Verbindungen. Hauptquelle von NMHC-Emissionen in Deutschland ist die Verwendung von Lösemitteln in Industrie, Gewerben und Haushalten. Verkehrsbedingte Emissionen stammen vorrangig aus der unvollständigen Verbrennung und Verdunstung von Kraftstoffen im Straßenverkehr. NMHC-Emissionen im Schienenverkehr kommen aus der Dieseltraktion sowie in geringem Umfang aus der Stromerzeugung für die Elektrotraktion. Die Gruppe der NMHC ist sehr heterogen, und entsprechend können auch die Auswirkungen der verschiedenen Komponenten für die menschliche Gesundheit sehr unterschiedlich sein. Einige Komponenten gelten als potentiell krebserregend, andere wie beispielsweise Benzol oder PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) wirken auch direkt toxisch auf den Menschen. Gemeinsam mit den Stickoxiden sind NMHC Vorläufersubstanzen des bodennahen Ozons und damit Mitverursacher des Photosmogs im Sommer.

Stickstoffoxid (NO_x)

Als Stickoxide werden verschiedene Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen zusammengefasst. Sie entstehen hauptsächlich bei Verbrennung unter hohen Temperaturen, wie sie für eine effiziente Energienutzung im Verbrennungsmotor nötig sind. Seit der Einführung von geregelten Dreiwege-Katalysatoren Anfang der 1990er Jahre sind die NO_x-Emissionen im Straßenverkehr rückläufig, dennoch verursacht er immer noch mehr als ein Drittel der NO_x-Emissionen in Deutschland. Grund dafür ist vor allen die technisch aufwendigere Umsetzung von Reduktionsmaßnahmen am Dieselmotor, der einen hohen Anteil am Pkw-Verkehr hat und bei Bussen, Lkw, nichtelektrischen Bahnen und Binnenschiffen die dominante Technologie ist.

Durch die Abgasgesetzgebung konnten bei den Bussen und Lkw jedoch bereits deutliche Minderungen erreicht werden. Diesel-Pkw stehen derzeit im Fokus, weil sie häufig die geltenden Grenzwerte nicht einhalten und daher aktuell einen hohen Beitrag zur Gesamtbelastung leisten. Bei den Bahnen und Binnenschiffen sind die spezifischen Emissionen noch relativ hoch – es

sollten aber aufgrund der geltenden Grenzwerte in den kommenden Jahren deutliche Minderungen erreicht werden.

Als wichtigste Umweltauswirkung der hohen Stickoxid-Emissionen ist die zunehmende Überdüngung von Boden und Gewässern (Eutrophierung) anzusehen, weiterhin sind sie auch an der Bildung von saurem Regen und dem davon verursachten Waldsterben beteiligt. Stickoxide sind Vorläufersubstanzen von bodennahem Ozon und somit Mitverursacher des Sommersmogs.

Schwefeldioxid (SO₂)

Schwefeldioxidemissionen resultieren fast ausschließlich aus der Verbrennung schwefelhaltiger Energieträger. Schwefeldioxid verursacht unterschiedliche Schäden bei Mensch und Tier (Atemwegserkrankungen), der Vegetation (Waldsterben), Boden und Gewässern (Versauerung) und Gebäuden (Säurefraß). Aus diesem Grund wurden die Schwefeldioxidemissionen in Deutschland in der Vergangenheit bei allen Verursachern stark reduziert, so dass die Mengen, die die Verkehrsträger bzw. die Kraftwerke und Raffinerien in Deutschland emittieren entsprechend gesunken sind. Allerdings entstehen größere Mengen SO₂ noch beim Seetransport der fossilen Primärenergieträger. Dies führt in dem Verkehrsartenvergleich zu hohen Anteilen der indirekten Emissionen bei allen Verkehrsträgern. Abhängig vom Entstehungsort sind die Wirkungen von Schwefeldioxid unterschiedlich zu bewerten. Für die Wirkung auf den Menschen sind vor allem die innerörtlichen Emissionen bedeutsam, für die anderen Wirkungen die überregionalen Emissionen (siehe (ifeu, 2000), S. 11).

Feinstaub (PM)

Unter Staub werden im Verkehr gewöhnlich diejenigen Feststoffe zusammengefasst, welche aus Verbrennungs- und Herstellungsprozessen stammen. Andere Staubemissionen, z. B. durch Reifenabrieb oder Aufwirbelungen von der Fahrbahn, werden separat erfasst. Die Staubemissionen bei elektrobetriebenen Fahrzeugen stammen daher vollständig aus der Energie- Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung, bei Verbrennungsantrieb wird der Großteil des Feinstaubs dagegen direkt am Fahrzeug emittiert.

Umweltauswirkungen von Staubemissionen sind Effekte wie Oberflächenverschmutzung oder Sichtbeeinträchtigung. Hauptproblem sind jedoch gesundheitliche Auswirkungen. Das betrifft vor allem Feinstaub, welcher Verweilzeiten von mehreren Tagen in der Atmosphäre aufweisen kann und besonders lungengängig ist. Er wird für Erkrankungen der Atemwege und des Herz-Kreislaufsystems verantwortlich gemacht.

In diesem Verkehrsartenvergleich werden die Partikelemissionen unterschieden in die Komponenten PM_{2.5} (alle Partikel kleiner als 2,5 µm) sowie PM₁₀ (alle Partikel kleiner 10 µm), wobei die PM₁₀ auch die Partikel kleiner als 2,5 µm enthalten. Besonders gefährlich für die menschliche Gesundheit sind dabei die besonders kleinen Partikel (PM_{2.5}), die vor allem bei Verbrennungsprozessen auftreten. Nicht enthalten sind die sogenannten Sekundärpartikelemissionen aus Black Carbon oder Schwefeldioxid-Emissionen.

Die verwendeten Datenquellen für die Energiebereitstellung von konventionellen Kraftstoffen und Strom unterscheiden die PM-Emissionen nicht nach Größen. In diesen Werten könnten auch größere Staubpartikel erfasst sein, deren Anteil jedoch gering sein sollte. Sie werden daher in dieser Studie ebenfalls als PM₁₀ bilanziert.

Die folgende Tabelle 10 gibt eine Übersicht über die im Verkehrsartenvergleich bilanzierten Luftschadstoffemissionen.

Tabelle 10: Betrachtete Luftschadstoffemissionen

Indikator	Kurzform	Relevante Wirkungen
Kohlenmonoxid	CO	Treibhauseffekt, Vergiftungssymptome
Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe	NMHC	Sommersmog, Kanzerogenität
Stickoxide	NO _x	Atemwegserkrankungen, Eutrophierung, Versauerung sowie Sommersmog, zusätzliche Klimawirkung Flugverkehr (EWF)
Schwefeldioxid	SO ₂	Versauerung, Atemwegserkrankungen, zusätzliche Klimawirkung Flugverkehr (EWF)
Partikel	PM _{2,5} PM ₁₀	Atemwegserkrankungen, zusätzliche Klimawirkung Flugverkehr (EWF)

2.4.5 Flächenbedarf

Flächennutzung ist eine häufig verwendete Wirkungskategorie in der ökologischen Beurteilung von Produkten und Dienstleistungen. Im Allgemeinen wird die Flächennutzung in Öko-Inventaren mit zwei oder drei verschiedenen Indikatoren angegeben, die durch Methoden der Wirkungsabschätzung³ im entsprechenden Schritt charakterisiert und bewertet werden (Hischier et al., 2010); (JRC, 2011b).

Am Anfang jeder Flächennutzung durch den Menschen steht die Umwandlung einer Fläche von einem (natürlichen oder unnatürlichen) Zustand in einen unnatürlichen Zustand. Dies wird in der Ökobilanzierung als „Flächenumwandlung“ oder „Transformation“ bezeichnet. In der Debatte um Klimawandel wird derselbe Prozess „Landnutzungsänderung“ bzw. auf Englisch „land use change“ genannt.

Z. B. kann ein Primärwald (natürlicher Zustand) gerodet werden um eine Straße zu bauen. Die Straße kann aber auch auf eine intensiv genutzte Landwirtschaftsfläche (unnatürlicher Zustand) gebaut werden. In beiden Fällen wäre die Umwandlung aus Umweltsicht als eine Abwertung der Fläche zu betrachten. Im Falle der Rodung von Primärwald wäre die Abwertung aber viel grösser als bei der Landwirtschaftsfläche, die aufgrund der intensiven Nutzung kaum mehr Biodiversität unterstützt und auch nur noch wenige andere Ökosystem-Dienstleistungen erbringt. Bei einer Flächenumwandlung wird also neben der umgewandelten Menge auch angegeben, von welchem Zustand in welchen Zustand die Transformation erfolgte.

Ist die Straße einmal gebaut, wird die entsprechende Fläche während der Lebensdauer der Straße daran gehindert, in einen natürlicheren Zustand zurückzukehren. Die Fläche wird also durch die entsprechende Nutzung während einer bestimmten Zeit besetzt. Die Ökobilanzierung spricht dafür von „Landnutzung“ oder „Landbesetzung“ (engl. „occupation“). Dies entspricht nicht ganz der „Landnutzung“ in der Klimadiskussion, da in der LCA-Community der Zeitaspekt der Nutzung nicht berücksichtigt wird⁴.

³ Für den detaillierten methodischen Hintergrund und die Terminologie zur Ökobilanzierung von Produkten und Dienstleistungen sei auf die ISO-Normen 14'040 ff zur Ökobilanzierung verwiesen, die auch der „VERUM-Methode“ zugrunde liegen.

⁴ Grund für diesen Unterschied liegt in der unterschiedlichen Perspektive: Ökobilanzierung nimmt eine „funktionale Perspektive“ ein, versucht also die Umweltwirkung eines bestimmten Produktes bzw. einer

Wird die Straße einmal nicht mehr gebraucht, kann die entsprechende Fläche entweder aktiv wieder umgewandelt werden (z. B. zu Siedlungsfläche, Landwirtschaft, Wald ...) oder die Fläche kann einfach verlassen werden, worauf sie mit genügend Zeit wieder in einen naturnahen Zustand zurückkehren würde. Somit gibt es, wenn man einen langen Zeitrahmen betrachtet, immer eine zweite Transformation.

Die bestehenden Verkehrsflächen in Deutschland werden zum Teil seit über 2000 Jahren als Verkehrsflächen genutzt. Aber sogar für Verkehrsflächen, die im letzten Jahrhundert umgewandelt wurden, ist oft nicht bekannt, welche Landnutzung vor der Transformation zu Verkehrsflächen bestand. Entsprechend wird in diesem Projekt für den Ausgangszustand der Flächen „unbekannt“ angenommen. Das scheint eine gute Option, da die Bewertungsmethoden für die Qualitätsverluste bei „unbekannten“ Flächen von einer durchschnittlichen Nutzung ausgehen, was auch für den effektiven Zustand vor der Umwandlung der besten Schätzung entspricht. Für die Klassifizierung der Verkehrsflächen nach der Transformation verwenden wir die Kategorien aus ecoinvent, da so für die meisten etablierten Wirkungsabschätzungsmethoden Wirkungsfaktoren verfügbar sind.

Verkehrsflächen sind primär ein Thema in Bezug auf die stationäre Verkehrsinfrastruktur. Der Flächenbedarf der energetischen Vorketten, konkret der Kraftstoff- und/oder Antriebsstrombereitstellung, kann, z. B. bei Agrokraftstoffen oder bei Strom aus Biomasse oder Braunkohle, ebenfalls relevant sein. Eine detaillierte Betrachtung des Flächenbedarfs der Energieversorgung ist aber im Rahmen dieses Projektes nicht zu leisten. Daten dazu sind z. B. in ecoinvent enthalten und sollen, bei Bedarf, aus dieser Quelle genommen werden.

Tabelle 11: Kategorien für Landbesetzung und Landtransformation (Definitionen ecoinvent)

Landnutzung/Landnutzungsänderung	Einheit
Occupation, traffic area, road network	m ² *a
Occupation, traffic area, rail network	m ² *a
Occupation, traffic area, rail/road embankment	m ² *a
Occupation, industrial area	m ² *a
Occupation, river, artificial	m ² *a
Transformation, to traffic area, road network	m ²
Transformation, to traffic area, rail network	m ²
Transformation, to traffic area, rail/road embankment	m ²
Transformation, to industrial area	m ²
Transformation, from unspecified	m ²

Dienstleistung zu bestimmen. Das UNFCCC, in dessen Rahmen die politikrelevante Klimadiskussion geführt wird, hingegen nimmt eine territoriale Perspektive ein, betrachtet also die Emission, die pro Jahr von einer Nation verursacht wird.

Grundsätzlich kann die Fläche, die durch stationäre Verkehrsinfrastruktur besetzt ist, relativ einfach bestimmt werden. Die entsprechenden Daten werden auch für die Berücksichtigung der Verkehrsinfrastruktur selber benötigt und liegen weitgehend beim Öko-Institut vor. Die Fahrleistungen liegen in TREMOD vor. Diese Daten werden primär für die Betrachtung der typischen Nutzung verwendet, was auch die Konsistenz der Flächenbetrachtung mit den übrigen Umweltwirkungen sichert. Allerdings muss in den meisten Fällen eine Allokation der Fläche auf die verschiedenen Verkehrsträger erfolgen, welche die Fläche gemeinsam nutzen. Genereller Hintergrund zu Allokationsprinzipien finden sie in Kapitel 2.2.6. Im Folgenden wird auf die Bestimmung der durchschnittlichen Wirkungen in Rahmen dieser Studie eingegangen.

Eine Durchschnittsbetrachtung basiert auf einem Status quo an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit (siehe auch Kapitel 2.2.1). Bezüglich Verkehrsflächen in Deutschland bedeutet das, dass die gesamte Fläche, die in Deutschland zu einer bestimmten Zeit (z. B. im Jahr 2017) durch Verkehrsinfrastruktur belegt ist auf den gesamten Verkehr verteilt wird, der im selben Zeitrahmen die Verkehrsinfrastruktur in Anspruch nimmt. Die Flächenbelegung wird ausgedrückt in m^2 . In Kombination mit dem Verkehr pro Zeit, gemessen als Fahr- oder Verkehrsleistung in Fahrzeug- oder Personen- bzw. Tonnenkilometer pro Jahr (km/a), ergibt sich ein Wert der Flächenbelegung in $Fläche \cdot Zeit / Verkehr$ ($m^2 \cdot a / Fzkm$ oder Pkm oder tkm).

Um die Flächenbelegung pro Verkehrsträger bzw. pro Verkehrsart zu bestimmen, muss auf eine Allokation zurückgegriffen werden. Wie in Kapitel 2.2.6 näher ausgeführt wird, ist Allokation immer mit arbiträren Werturteilen verbunden. Aus diesem Grund untersuchen wir hier zwei grundsätzlich unterschiedliche Allokationsgrundlagen und weisen die entsprechenden Ergebnisse aus.

Variante A basiert auf der Flächenbelegung durch Einzelfahrzeuge während der Fahrt unter Berücksichtigung der Zeit, die das Fahrzeug benötigt, um einen Kilometer zurückzulegen ($m^2 \cdot sec / Fzkm$) sowie der jährlichen Fahrleistung, mit der diese Flächenzeit multipliziert wird. Grundsätzlich wird hierbei die Fahrzeuglänge und der systembedingte Mindestabstand zwischen zwei Fahrzeugen – z. B. der Bremsweg bei Straßenfahrzeugen oder der Abstand, der durch die Sperrung von Bahnabschnitten für andere Züge in der Zeit, in der ein Zug den Abschnitt befährt, entsteht („Blockabstand“) – addiert und diese Summe mit der Spurbreite multipliziert. Bei Fahr- und Kleinmotorrädern wird neben der Fahrzeugbreite zusätzlich nur der Teil der Spurbreite angerechnet, der als Abstand für sicheres Überholen erforderlich ist. Die entsprechenden Flächenzeiten pro Fahrzeug- und Straßentyp (die Fläche hängt von Fahrzeug, Geschwindigkeit, Spurbreite und ggf. Systemtechnik ab) werden als Basis für die Allokation der Verkehrsflächen auf die Fahrzeugtypen verwendet⁵. Diese Variante ist nicht geeignet zur Bestimmung der Umweltkosten der Landnutzung, da die Berechnungen der spezifischen Externalitäten ($€/m^2$) auf Daten gemäss Variante B basieren.

Variante B basiert auf dem Ansatz, dass die benötigte Verkehrsfläche einerseits mit der jährlichen Fahrleistung und andererseits mit der Fahrzeuggröße (Standfläche) zusammenhängt. In dieser Variante werden die Flächen der Fahrzeuge (Fahrzeuglänge x Fahrspurbreite) mit den Fahrleistungen der Fahrzeuge multipliziert. Bei Fahr- und Kleinmotorrädern wird allerdings nicht die benötigte Fahrspurbreite berücksichtigt, sondern nur die Breite des stehenden Fahrzeugs (0,5 m). Die resultierenden Werte werden für die Allokationsverhältnisse verwendet. Diese Variante eignet sich zur Bestimmung der Umweltkosten der Landnutzung, da die Berechnungen der spezifischen Externalitäten ($€/m^2$) auf kompatiblen Grundlagen basieren.

⁵ Diese Variante ist auch geeignet, bestimmte Arten von Marginalbetrachtungen durchzuführen, z. B. die Auswirkungen zusätzlicher Fahrten auf die Auslastung von Strecken oder die Auswirkungen von Maßnahmen auf die Kapazität von Verkehrswegen zu berechnen.

Bei der Binnenschifffahrt stellt sich kein Allokationsproblem, weil nur eine Fahrzeugkategorie betrachtet wird. Als Flächenbedarf wird nicht nur die künstliche Wasserfläche von Kanälen berechnet, sondern zusätzlich wird für die Binnenschifffahrt auf Flüssen, die als Bundeswasserstraße der Klasse I bis VIc dienen und entsprechend denaturiert sind, auch eine denaturierte Wasserfläche für die Fahrrinne angerechnet. Zusätzlich wird an diesen Flüssen ein mittlerer denaturierter Uferstreifen von je 0,6 m (beidseitig) angerechnet. In Variante A wird bei der Berechnung des Flächenbedarfs pro Schiff zudem berücksichtigt, dass der Zugang zu Kanälen sowie Flüssen (außer Rhein) in der Regel durch Schleusen limitiert wird, so dass sich systembedingt ein großer Abstand zwischen den einzelnen Schiffen ergibt. In Variante A wird zusätzlich zum Mittelwert über alle Bundeswasserstraßen auch die Flächenbelegung pro Tonnenkilometer für den Rhein, die Kanäle sowie die übrigen Flüsse getrennt dargestellt.

Bei Flughäfen, wo nur eine Allokation zwischen Güter- und Personentransporten nötig ist, wird in beiden Varianten nur die Fläche der 25 großen Verkehrsflughäfen berücksichtigt (jeweils Verkehrsanlagen, Gebäude sowie die restliche eingezäunte Fläche des Flughafens). Somit wird bislang weder die Fläche der 13 kleineren Verkehrsflughäfen mit gewerblichem Luftverkehr erfasst noch die Fläche sonstiger Flughäfen und Landeplätze. Allerdings wird auf diesen 25 Flughäfen der Löwenanteil des gewerblichen Luftverkehrs in Deutschland abgewickelt, während die anderen Anlagen z. T., auch anderen Zwecken dienen. Insofern wird die Flächenbelegung des gewerblichen Luftverkehrs hier tendenziell untererfasst.

Bei der Allokation der Flächen auf Güter- und Personenverkehr im Luftverkehr ist der entscheidende Parameter die Anzahl der Starts- und Landungen. Die verfügbaren Daten unterscheiden zwischen nationalen und internationalen Flügen, nicht aber zwischen Personen- und Frachtflügen, wobei viele Personenflüge auch Güter transportieren. Die Transportweite der Fracht ist aber vor allem im internationalen Verkehr im Mittel höher als bei Personen. Es wird in beiden Varianten das gleiche Verfahren angewendet und eine Allokation vorgenommen, die dies bei der Allokation auf Personen- und Gütertransporte näherungsweise berücksichtigt.

In beiden Varianten wird grundsätzlich die gesamte Verkehrsfläche auf verkehrliche Nutzung alloziert mit Ausnahme von 50 % bis 90 % der Gemeindestraßen, die einer nichtverkehrlichen Erschließungs- und Aufenthaltsfunktion zugeordnet werden. Bei Flughäfen wird 7 % der Fläche nichtverkehrlichen Funktionen (nichtgewerbliche Starts- und Landungen) zugeordnet. Bei Bundeswasserstraßen ist der Anteil der Personen- und Freizeitschifffahrt nicht bekannt, weshalb 100 % der Fläche den Güterschiffen zugeordnet wird.

Die Resultate zum Flächenbedarf sind im Ergebniskapitel 4.2.3 dargestellt.

2.4.6 Verkehrsunfälle

Die Verkehrsunfälle und deren Folgen gehören zwar nicht zu den Umweltwirkungen des Verkehrs. Mit den damit verbundenen Gesundheitsfolgen sind die Wirkungen von Verkehrsunfällen aber doch vergleichbar mit den langfristigen Wirkungen von Umweltbelastungen wie Luftverschmutzung und Lärm. Für den Vergleich verschiedener Verkehrsarten und Verkehrsmittel sind die Unfälle deshalb bedeutsam, insbesondere im Straßenverkehr (die anderen Verkehrsarten haben deutlich geringere Unfallraten). Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurden deshalb auch die Verkehrsunfälle als Wirkungskategorie und Vergleichsgröße betrachtet, soweit dies aufgrund der Datengrundlagen möglich ist.

Verkehrsunfälle haben verschiedene Folgen für den Menschen und die Wirtschaft:

- ▶ Personenschäden: Verkehrsunfälle können zu Personenschäden führen. Betroffene Personen können sich verletzen (in der Regel wird unterschieden zwischen leicht und schwer verletzten Personen) oder sogar getötet werden.
- ▶ Sachschäden: Verkehrsunfälle können zu Sachschäden führen, insbesondere an Fahrzeugen.
- ▶ Folgewirkungen: Als Folge von Verletzungen können weitere Folgewirkungen auftreten, z. B. medizinische Behandlungskosten für verletzte Personen, Arbeitsausfälle von betroffenen Personen mit entsprechenden Folgekosten.

Kenngößen

Für den Vergleich verschiedener Verkehrsarten in Bezug auf Verkehrsunfälle stehen die folgenden Indikatoren bzw. Kenngrößen im Vordergrund:

- ▶ Anzahl Verkehrsunfälle: Die Gesamtsumme der Verkehrsunfälle ist ein möglicher Indikator. Weil die Unfallschwere jedoch sehr unterschiedlich sein kann und es diesbezüglich zwischen den Verkehrsmitteln große Unterschiede gibt, ist eine weitere Differenzierung der Verkehrsunfallzahlen hilfreich: Verkehrsunfälle ohne Personenschäden (reine Sachschäden), Verkehrsunfälle mit Verletzten (differenziert: Leichtverletzte/Schwerverletzte), Verkehrsunfälle mit Todesfällen. Allerdings ist die Datenverfügbarkeit für nach Unfallschwere differenzierte Unfalldaten eingeschränkt.
- ▶ Anzahl verunfallter Personen: Bei der Anzahl verunfallter Personen sollen differenzierte Kenngrößen angewendet werden: Leichtverletzte, Schwerverletzte, Todesfälle (Getötete)

Für einen Vergleich der Verkehrsarten sind die erwähnten Kenngrößen (Anzahl Unfälle, Anzahl Verunfallte) in Bezug zur Verkehrsleistung (Pkm, tkm) zu stellen.

Datengrundlagen

Zur Anzahl Verkehrsunfälle und der Anzahl verunfallten Personen liegen gute Daten vor, insbesondere im Straßenverkehr, der in Bezug auf die Unfälle am relevantesten ist. Zentrale Grundlage für das vorliegende Vorhaben bilden die offiziellen statistischen Daten von Destatis: Die jährliche Publikation „Verkehrsunfälle, Fachserie 8, Reihe 7 (mit Ergebnissen für das Jahr 2017) (DESTATIS, 2018a) weist für den Straßenverkehr unter anderem detaillierte Unfallzahlen nach Art und Schwere der Unfälle sowie Daten zur Anzahl verunfallten Personen nach Verletzungsschwere und Anzahl Getöteten aus. Zudem weist die Statistik Unfalldaten sowohl nach Beteiligung (Betroffenheit) als auch nach Verursacher aus (vgl. Allokationsfragen weiter unten).

Eine Schwierigkeit bei den Unfalldaten ist der oft sehr große Graubereich an Unfällen, der in den Statistiken nicht abgedeckt ist („Dunkelziffer“). In der Regel fließen nur jene Unfälle in die Statistiken, die polizeilich gemeldet sind. Eine erhebliche Zahl an Unfällen, insbesondere bei den Unfällen ohne Personenschäden (nur Sachschäden), wird jedoch nicht an die Polizei gemeldet und wird damit in den öffentlichen Statistiken in der Regel nicht erfasst.

Allokation/Zuordnung der Unfälle

Ein wichtiger Aspekt in Bezug auf die Vergleichbarkeit von Verkehrsunfällen bzw. Unfallrisiken verschiedener Verkehrsarten und Verkehrsmittel stellt die Frage der Allokation der Verkehrsunfälle auf die Verkehrsmittel dar. Kein Problem ergibt sich bei Selbstunfällen oder bei Unfällen, bei denen nur eine Verkehrsart bzw. ein Verkehrsmittel beteiligt ist, z. B. ein Unfall

zwischen zwei Personenwagen. Anders ist die Situation bei Unfällen, bei denen zwei verschiedenen Verkehrsarten involviert sind, was im Straßenverkehr relativ oft der Fall ist. Welcher Verkehrsart wird beispielsweise ein Unfall zwischen einem Personenwagen und einem Fußgänger, bei dem sich der Fußgänger verletzt, angerechnet? Dazu gibt es verschiedene Allokationsprinzipien:

- ▶ **Monitoring- bzw. Betroffenheitsprinzip:** Die verunfallten (oder getöteten) Personen werden demjenigen Verkehrsmittel angelastet, mit dem die verunfallte Person unterwegs war. Gibt es also wie im obengenannten Beispiel einen verletzten Fußgänger, wird der Verletzte in der Statistik der Kategorie Fußgänger zugeordnet. Bei der Anzahl Unfälle ist die Allokation über die Betroffenheit etwas komplizierter. Entweder werden die Unfallzahlen als einfache Matrix ausgewiesen (was differenzierte Statistiken machen): Dabei wird nicht nur sichtbar, wie viele Unfälle mit Personenwagen es insgesamt gab, sondern auch wie viele Unfälle zwischen Personenwagen und Lkw, Personenwagen und Fahrrädern, etc. Bei einem vereinfachten Vorgehen wird ein Unfallereignis mit mehreren Verkehrsarten bei beiden involvierten Verkehrsarten als Unfall gezählt.
- ▶ **Schuld- bzw. Verursacherprinzip:** Der Unfall wird jenem Verkehrsmittel angelastet, der die Schuld daran trägt bzw. der Verursacher des Unfalls ist. Ist im genannten Beispiel der Fußgänger beispielsweise schuld am Unfall, wird dieser dem Fußgänger angelastet. Umgekehrt wird der Unfall den Personenwagen zugerechnet, wenn der Pkw-Lenker die Schuld am Unfall trägt. Statistische Unfalldaten liegen jedoch in der Regel nicht nach dieser Differenzierung vor.
- ▶ **Intrinsisches Risiko bzw. Schadenspotenzial:** Bei diesem Ansatz steht unabhängig von der Schuldfrage das mögliche Schadenspotenzial eines Verkehrsmittels gegenüber einem anderen Verkehrsmittel im Vordergrund. Dahinter steht der Gedanke, dass beispielsweise Fußgänger und Radfahrer allein durch ihr Verkehrsmittel und dessen ‚Ausrüstung‘ schwächere Verkehrsteilnehmer sind, die bei Unfällen mit anderen (motorisierten) Verkehrsmitteln in der Regel stärker negativ betroffen sind. Auf der anderen Seite weisen motorisierte Verkehrsmittel ein höheres intrinsisches Risiko auf, andere Verkehrsteilnehmende zu verletzen. Vor diesem Hintergrund werden bei diesem Prinzip Unfälle immer jenem Verkehrsmittel zugerechnet, das über ein höheres intrinsisches Risiko verfügt, andere zu gefährden. Unfälle mit Personenkraftwagen und Fußgängern oder Radfahrern werden somit immer den Pkw angerechnet. Dieses Prinzip kann nur umgesetzt werden, wenn detaillierte Unfalldaten verfügbar sind, bei denen immer alle involvierten Verkehrsarten ausgewiesen werden. Der Nachteil dieser Allokationsmethode liegt darin, dass ihr eine gewisse Wertung zu Grunde liegt.

Für das vorliegende Vorhaben erfolgt die **Allokation nach Betroffenheit** bzw. Beteiligung. Dieses Prinzip hat den Vorteil, dass keine subjektiven Einschätzungen nötig sind. Zudem liegen die statistischen Datengrundlagen von Destatis nach diesem Prinzip vor. Der Nachteil liegt allerdings darin, dass keine verursachergerechten Aussagen möglich sind.

2.4.7 Lärm

Verkehrslärm kann zu einer Vielzahl schädlicher Wirkungen führen, insbesondere zu verschiedenartigen Gesundheitsschäden (z. B. Herz-Kreislauf-Erkrankungen) sowie einer Belästigungswirkung (Beeinträchtigung der Lebensqualität).

Verschiedene Verkehrsarten unterscheiden sich sehr stark in Bezug auf den von ihnen verursachten Verkehrslärm. In Bezug auf die Lärmwirkung sind die Lärmimmissionen (Lärmbelastung) relevant. Diese wiederum hängen von den Lärmemissionen und von weiteren Faktoren ab wie z. B. Ausbreitungssituation, Bevölkerungsdichte entlang von Straßen, Bebauungsart, bestehende Verkehrsmenge, Tageszeit.

Ein Vergleich von Verkehrsarten auf der Ebene von Emissionen wäre einfach, erweist sich aber als nur bedingt aussagekräftig. Ein aussagekräftigerer Indikator ist jedoch schwierig zu identifizieren und bedürfte einer eigenen, vertieften Studie. Aus diesem Grund wird in diesem Vorhaben auf einen Vergleich physikalischer Indikatoren zum Verkehrslärm verzichtet. Das Thema Verkehrslärm wird aber mit einer punktuellen Vertiefung zu den Verkehrskosten im Straßenverkehr betrachtet. Die entsprechenden Ausführungen zum Vorgehen finden sich im Kapitel 2.5.3.

2.5 Umwelt- und Unfallkosten

2.5.1 Übersicht

Bei der ökologischen Bewertung von Verkehrsarten stehen in der Regel Umweltbelastungen (Emissionen), Ressourcenverbräuche oder die Veränderung des Umweltzustands (z. B. Immissionen) im Vordergrund. Diese **Wirkungskategorien** stehen auch im vorliegenden Projekt im Fokus. Für eine vergleichende Bewertung kann es jedoch wertvoll sein, wenn ein Vergleich verschiedener Verkehrsarten und Verkehrsmittel nicht nur für die einzelnen Umweltkategorien vorgenommen wird, sondern aggregiert für verschiedene Umweltwirkungen. Neben den hier nicht im Vordergrund stehenden Methoden zur Ökobilanzierung stellen die Umweltkosten (bzw. volkswirtschaftlichen Kosten) ein Ansatz zur Aggregation verschiedener Wirkungskategorien. Die **Monetarisierung von Umweltwirkungen** stellt zudem eine aus volkswirtschaftlicher Sicht bedeutende Größe dar, die eine vollständige Betrachtung ermöglicht und für verschiedene Anwendungsbereiche bedeutsam ist:

- ▶ Bei **Wirtschaftlichkeitsrechnungen** für die Evaluation von Investitionen (z. B. Verkehrsinfrastrukturen) sollten neben den betriebswirtschaftlichen Kosten auch die relevanten Umweltkosten einbezogen werden. Dies hilft, volkswirtschaftlich optimale Investitionsentscheidungen zu fällen, welche die Umwelt weniger stark belasten. Das heißt beispielsweise, dass im Rahmen von Nutzen-Kosten-Analysen auch die Umweltkosten (und Unfallkosten) berücksichtigt werden müssen.
- ▶ Bei der **Beurteilung von Umweltschutzmaßnahmen** (z. B. Umweltzone, Lärmschutzwände) kann der Umweltnutzen einer Maßnahme in Geldeinheiten ausgedrückt werden. Diese Monetarisierung von Umwelteffekten kann beispielsweise in Gesetzesfolgenabschätzungen angewandt werden.
- ▶ Für die **Gestaltung von Instrumenten**, zum Beispiel von Steuern und Abgaben im Verkehrsbereich, können Umweltkosten eine wichtige Grundlage bilden. Sollen die externen Umweltkosten internalisiert werden, das heißt den Verursachern angelastet werden,

müssen sie auf den Endpreis geschlagen werden. Dies kann z. B. im Rahmen von Energiesteuern, CO₂-Abgaben oder Mautgebühren erfolgen.

2.5.2 Vorgehen: Wirkungskategorien und Datengrundlagen

Im vorliegenden Forschungsvorhaben werden deshalb die Umwelt- und Unfallkosten der verschiedenen Verkehrsarten/Verkehrsmittel berechnet, soweit es etablierte Methoden zur Monetarisierung gibt. Betrachtet werden im vorliegenden Vorhaben die folgenden Wirkungskategorien:

- ▶ **Luftschadstoffemissionen:** Gesundheitsschäden, Gebäude-/Materialschäden, Ernteauffälle, Biodiversitätsverluste
- ▶ **Klima/Treibhausgasemissionen:** Kosten infolge Treibhausgasemissionen
- ▶ **Flächenbedarf:** Verlust von natürlichen Habitaten bzw. Ökosystemen, Fragmentierung von Ökosystemen (Habitaten)
- ▶ **Lärm:** Gesundheitsschäden, Beeinträchtigung der Lebensqualität
- ▶ **Unfälle:** Gesundheitsschäden, Folgekosten (z. B. ungedeckte Polizei-, Rechts-, Sachkosten)

Keine etablierten Monetarisierungsansätze gibt es bisher für den Ressourcenverbrauch.

Die Luftschadstoffe, Treibhausgase, Flächenbedarf, Unfälle und Lärm sind die in der Literatur am breitesten etablierten **Kostenbereiche des Verkehrs** und stehen im Vorhaben im Vordergrund. Zu den Umweltkosten des Verkehrsflächenbedarfs bzw. den Habitatbeeinträchtigungen gibt es weniger umfangreiche wissenschaftliche Literatur. Dennoch existieren dazu, zum Teil vereinfachte, Ansätze zur Monetarisierung. Für die Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen werden auch die Kosten der indirekten Emissionen aus den vor- und nachgelagerten Prozessen ermittelt: Energiebereitstellung, Infrastruktur (Herstellung, Unterhalt, Entsorgung), Fahrzeuge (Herstellung, Unterhalt, Entsorgung).

Wenn immer möglich wird im vorliegenden Vorhaben auf Grundlagen aus der UBA-Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten (Umweltbundesamt, 2019a) zurückgegriffen. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht zu den Wirkungskategorien und den monetarisierbaren Effekten. Sie zeigt zudem, welche Wirkungen in der UBA-Methodenkonvention 3.0 abgedeckt sind und welche Differenzierungen möglich sind.

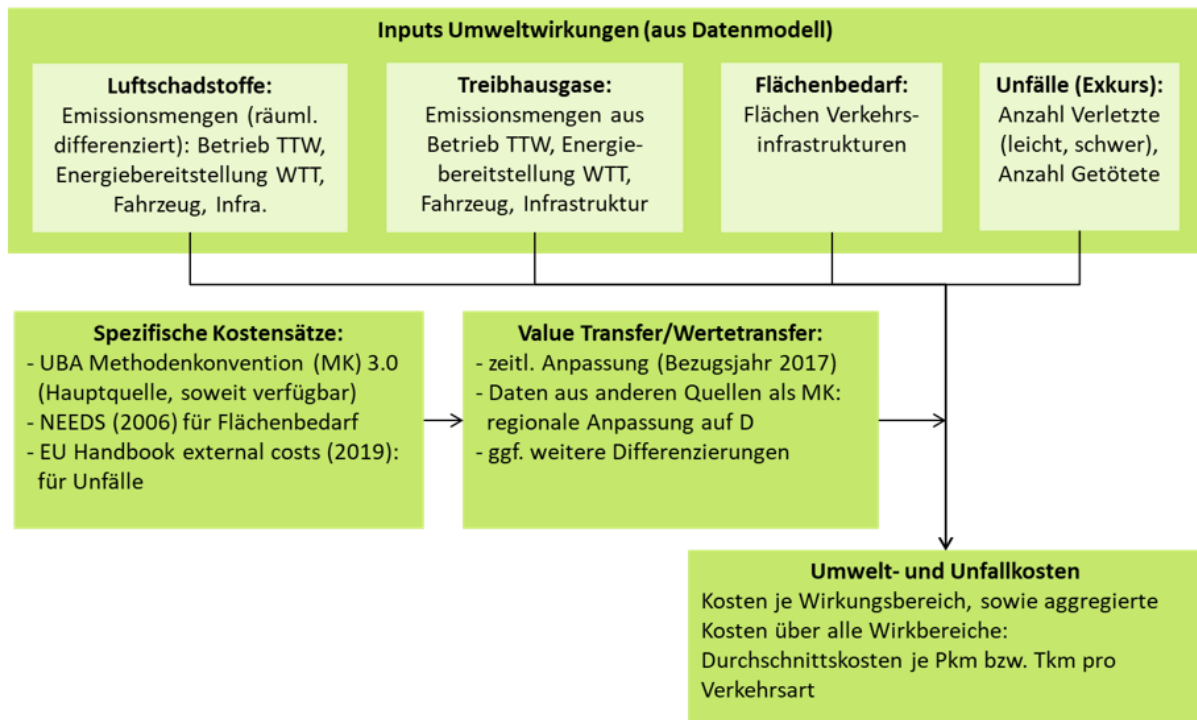
Tabelle 12: Übersicht zur Monetarisierung der Effekte (Kosten) der einzelnen Wirkungskategorien

Wirkungskategorie	Monetarisierbare Effekte	Gewählte Differenzierung, Schadstoffe etc.	Datengrundlage für Monetarisierung
Luftschadstoffemissionen	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschäden - Ernteauffälle - Gebäude-/Materialschäden - Biodiversitätsverluste 	Schadstoffe: Stickoxide (NO _x), Feinstaub (PM ₁₀ und PM _{2.5}), Schwefeldioxid (SO ₂), Flüchtige organische Kohlenwasserstoffe (NMVOC) Differenzierung: innerorts, außerorts, Autobahn Luftverkehr: nur Start- und Landeemissionen	UBA-Methodenkonvention 3.0 (Umweltbundesamt, 2019a)
Treibhausgasemissionen	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschäden - Biodiversitätsverluste - Risiken & Gefahren - Beeinträchtigung von Ökosystemleistungen 	Schadstoffe: Kohlendioxid (CO ₂), Methan (CH ₄), Lachgas (N ₂ O) Luftverkehr: inkl. zusätzl. Klimawirkung Flugverkehr (EWF, vgl. Kap. 2.4.3)	UBA-Methodenkonvention 3.0 (Umweltbundesamt, 2019a)
Verkehrsflächen/ Flächenbedarf	<ul style="list-style-type: none"> - Habitatverluste (Verlust von Ökosystemen) - Habitatfragmentierungen, Zerschneidung Berücksichtigt werden lediglich die verbauten Flächen, d. h. die Verkehrswege/Gebäude/Industrieflächen.	Räumlich differenziert: innerorts, außerorts	EU-Forschungsprojekt NEEDS (NEEDS 2006)
Verkehrsunfälle	<ul style="list-style-type: none"> - Personenschäden - Sachschäden - Polizei-, Rechtskosten 	Verunfallte Personen nach Verletzungsschwere: Leichtverletzte, Schwerverletzte, Getötete	EU Handbook on external costs of transport (DG MOVE, 2019)
Lärm	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschäden (mit folgenden Kostenkategorien: Kosten Gesundheitssystem, Produktionsausfallkosten, immaterielle Kosten) - Belästigungswirkungen (immaterielle Kosten) 	Räumlich differenziert: innerorts, außerorts, Autobahn	Eigene Berechnungen im vorliegenden Vorhaben, basierend auf UBA-Methodenkonvention 3.0 (Umweltbundesamt, 2019a) und (DG MOVE, 2019), vgl. Kap. 2.5.3

Die folgende Abbildung zeigt schematisch das **Vorgehen zur Monetarisierung** der Umwelt- und Unfallkosten. Grundsätzlich erfolgt die Monetarisierung immer durch Verrechnung eines Datengerüsts (Emissionsmengen, Flächenbedarf, Unfallbetroffene) mit differenzierten Kostensätzen. Als Ergebnis resultieren Durchschnittskosten je Pkm bzw. tkm je Verkehrsart.

Allerdings ist der Differenzierungsgrad bei den verschiedenen Wirkungskategorien unterschiedlich.

Abbildung 4: Schematisches Vorgehen zur Monetarisierung der Umwelt- und Unfallkosten



TTW: Tank-to-Wheel (Emissionen aus Betrieb). WTT: Well-to-Tank (Emissionen aus den Vorketten der Energiebereitstellung).

Quelle: eigene Darstellung. MK: Methodenkonvention zur Schätzung von Umweltkosten des Umweltbundesamtes.

Im Bereich Lärm weist die Methodenkonvention 3.0 des UBA (Umweltbundesamt, 2019a) keine Kostensätze nach Verkehrsleistung auf, sondern lediglich Kostensätze pro lärmbelastete Person und Dezibel-Klasse. Aus diesem Grund können die Lärmkosten nicht direkt daraus ermittelt werden. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens werden deshalb keine umfassenden Lärmkosten berechnet und ausgewiesen. Die Lärmkosten werden lediglich als Exkurs vertieft: Es wird eine grobe Abschätzung der Verkehrslärmkosten vorgenommen, allerdings nur für den Straßenverkehr. Das folgende Kapitel zeigt das Vorgehen und die Ergebnisse zur Schätzung der Lärmkosten für den Straßenverkehr.

2.5.3 Vertiefung Lärmkosten

Lärmkosten des Verkehrs wurden bereits in verschiedenen internationalen Studien ermittelt (z. B. (DG MOVE, 2019), (Bieler et al., 2019)). Für Deutschland liegen aber keine aktuellen, nach dem Wirkungspfadansatz basierend auf detaillierten Lärmimmissionsdaten berechneten Daten zu durchschnittlichen Lärmkosten verschiedener Verkehrsarten vor. Die Methodenkonvention des Umweltbundesamtes weist in der aktuellen Version 3.0 (Umweltbundesamt, 2019a) ebenfalls keine Kostensätze pro Fahr- oder Verkehrsleistung für den Lärm aus. Allerdings enthält die Methodenkonvention 3.0 Kostensätze pro lärmbelastige Person und Jahr differenziert nach Dezibel-Klassen. Zusätzlich enthält die Methodenkonvention 3.0 eine

Schätzung der bundesweiten Lärmkosten für die drei Verkehrsträger Straßen-, Schienen- und Luftverkehr.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird, basierend auf den aus der Methodenkonvention 3.0 vorliegenden Grundlagen, eine **einfache Schätzung von durchschnittlichen fahrleistungsbezogenen Lärmkosten** verschiedener Verkehrsmittel des Straßenverkehrs vorgenommen. Dabei werden zwei Berechnungsansätze verfolgt: Im Vordergrund steht die ‚Hauptmethode‘, bei der die Kostensätze pro Fzkm aus Daten zur Lärmwirkung je Fahrleistung ermittelt werden (vgl. Vorgehensweise unten). Mit einer zweiten, alternativen Methode erfolgt die Berechnung aus den bundesweiten Lärmkosten des Straßenverkehrs (basierend auf der Anzahl Lärmbetroffener nach Umgebungslärmrichtlinie). Die beiden Ansätze sind im Folgenden kurz beschrieben.

Neben den Durchschnittskosten pro Fzkm werden in der Hauptmethode auch die Gesamtkosten für Deutschland abgeschätzt. Die Ergebnisse werden schließlich mit den Ergebnissen anderer Studien, insbesondere den laufenden Arbeiten auf EU-Ebene zum ‚Handbook on external costs of transport‘ (DG MOVE 2019), verglichen.

Es ist wichtig zu betonen, dass die vorliegende Vertiefung nicht ausreichend fundiert ist, um die Ergebnisse direkt in die Methodenkonvention 3.0 übernehmen zu können. Die Ergebnisse sollen aber einen Hinweis zur **Bandbreite an realistischen Kostensätzen** für Lärmkosten pro Fzkm im Straßenverkehr liefern und möglichen Vertiefungsbedarf aufzeigen.

Vorgehen Hauptmethode

In der Hauptmethode werden fahrleistungsspezifische Lärmkostensätze unter Nutzung von Teilergebnissen der Dissertation von Althaus (Althaus, 2012) und Kostensätzen je betroffener Person und Jahr aus der UBA-Methodenkonvention 3.0 (Umweltbundesamt, 2019a) hergeleitet. Das genaue Vorgehen ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt und besteht aus den folgenden Schritten:

- ▶ Zentrale Basis bildet die Anzahl stark belästigter Personen je Fahrzeugkilometer/Jahr (Jahresfahrleistung) aus der Dissertation von (Althaus, 2012). In dieser Dissertation wurde mit Hilfe eines Lärmimmissionsmodells für verschiedene räumliche Situationen ein Bezug zwischen Verkehrsleistung, Lärmemissionen, Lärmimmissionen und Anzahl stark Belästigter (HA, Highly Annoyed) hergestellt und auf einen Fahrzeugkilometer (Fzkm, vgl. Tabelle 13) pro Jahr bezogen.⁶ Diese Ergebnisse liegen folgendermaßen differenziert vor:
 - Verkehrsmittel: Pkw, Lkw, Lieferwagen, Motorräder
 - Räumliche Situation: Städtisch, Autobahn, außerhalb von Städten, unspezifisch (Mittelwert über alle räumlichen Situationen)
 - Tageszeit (Tag, Nacht, unspezifisch) und Wochentag (Werktag, Samstag, Sonntag, unspezifisch). Bei diesen beiden Attributen wurden in den vorliegenden Berechnungen die nicht differenzierten (unspezifischen) Werte verwendet.

Die verwendeten Grundlagendaten basieren auf Lärmmodelldaten aus der Schweiz. Wir nehmen im Folgenden pauschal an, dass die Ergebnisse direkt auf Deutschland übertragbar

⁶ In Althaus (2012) sind die Detailergebnisse im Annex fälschlicherweise in [HA/Fzkm] angegeben. Weil bei den Berechnungen die Belästigtenzahlen aber in Relation zur Jahresfahrleistung [Fzkm/Jahr] einer Straße gestellt werden, wäre die korrekte Einheit der Ergebnisse [HA / (Fzkm/Jahr)] bzw. [HA * Jahr / Fzkm].

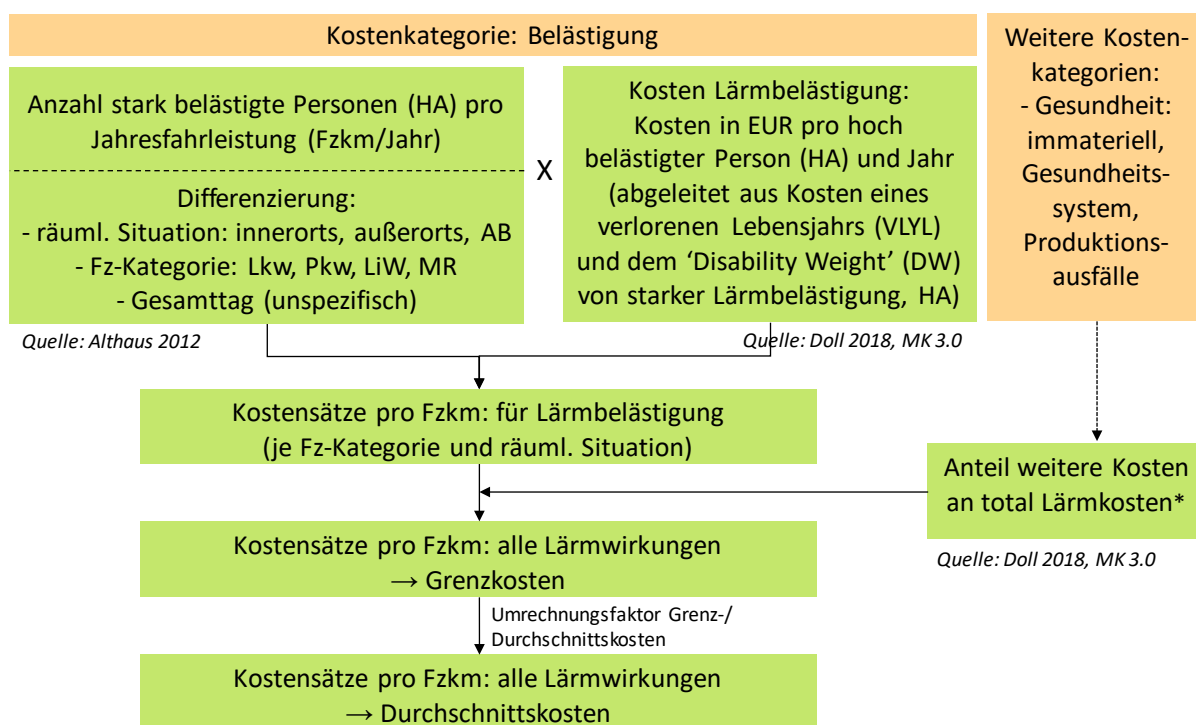
sind. Eine detaillierte Schätzung der Unterschiede in den Kostensätzen, die aus Unterschieden in der Bevölkerungsdichte, Bebauungsstrukturen und Verkehrsmengen zwischen beiden Ländern resultieren, ist an dieser Stelle nicht möglich. Immerhin zeigen aber Daten zur Bevölkerungsdichte in größeren Städten beider Länder, dass die Bevölkerungsdichte in Städten ähnlich ist.⁷

Tabelle 13: Anzahl stark lärmbelästigter Personen (Highly Annoyed, HA) pro 1 Mio. Fzkm/Jahr

räumliche Situation	Lkw	Pkw	Lieferwagen	Motorräder
innerorts	171	16,4	15,6	188
außerorts	26,0	4,3	4,2	43,1
Autobahn	5,2	1,5	1,6	13,4
nicht differenziert	40,8	6,0	5,2	75,6

Quelle: (Althaus, 2012)

Abbildung 5: Schematisches Vorgehen Schätzung durchschnittliche Lärmkosten: Hauptmethode



Abkürzungen: LiW: Lieferwagen, MR: Motorräder, AB: Autobahn, HA: Highly Annoyed (stark Belästigte), MK: Methodenkonvention.

⁷ Die Bevölkerungsdichte in den 80 größten Städten Deutschlands liegt insgesamt bei 1.900 Einwohnern pro km², wobei in 80 % der Städte die Bevölkerungsdichte bei 1.000 bis 3.000 E./m² liegt (DESTATIS, 2018c). In der Schweiz liegt die Bevölkerungsdichte in den 50 größten Städten bei 1.700 Einwohnern pro km², wobei in rund zwei Drittel der Städte die Bevölkerungsdichte bei 1.000 bis 3.000 E./m² liegt (Bundesamt für Statistik, 2019).

- ▶ Die Anzahl stark Belästigte je Fzkm/Jahr kann direkt mit Lärmkostensätzen aus den Grundlagen der UBA-Methodenkonvention 3.0 verrechnet werden. Aus den Grundlagenarbeiten zu den Lärmkosten (Doll, 2018b) für die Methodenkonvention sind Kostensätze pro stark belästigte Person und Jahr abgeleitet worden. Dabei wurden die gleichen zentralen Inputdaten des Lärmmodells verwendet, wie sie für die Methodenkonvention 3.0 verwendet wurden (Expositions-Wirkungs-Funktionen, Disability Weights, Value of Life Year Lost VLYL). Basis für die Expositions-Wirkungs-Funktionen bilden die Ergebnisse aus (WHO, 2011). Die Kosten pro stark belästigte Person (HA) und Jahr können auf Basis (Doll, 2018a) und (Doll, 2018b) aus Kosten eines verlorenen Lebensjahrs (VLYL) und dem 'Disability Weight' (DW) von starker Lärmbelästigung (HA) wie folgt berechnet werden: Kosten pro stark belästigte Person (HA) und Jahr = VLYL * DW (HA) * Korrekturfaktor / Jahr mit:
 - VLYL (Value of Life Year Lost): Wert eines verlorenen Lebensjahrs: 69.445 €₂₀₁₅
 - DW (Disability Weight) für starke Lärmbelästigung (HA): 0,02
 - Korrekturfaktor für anrechenbarer Anteil der Bevölkerung⁸ (>30 Jahre): 0,8
- ▶ Als Ergebnis resultieren Kostensätze pro Fahrzeugkilometer, differenziert nach Verkehrsmittel und räumlicher Situation. Die Kosten decken allerdings lediglich die Kosten infolge Lärmbelästigung ab, nicht aber die Gesundheitskosten. Gemäß (Doll, 2018a) machen die Kosten durch Lärmbelästigung im Mittel über alle dB-Klassen rund 75 % der gesamten Lärmkosten aus, die physischen und psychischen Gesundheitskosten machen 25 % aus. Je nach dB-Klasse variiert der Anteil der Lärmbelästigung zwischen 72 % und 78 % (bei den dB-Klassen über 55 dB). Weil der Anteil der Kosten durch Belästigungen so hoch ist, können die gesamten Lärmkosten (inkl. Gesundheitskosten) aus den Kosten der Belästigung geschätzt werden.
- ▶ Die Hauptidee der Lärmbetroffenen je Fzkm/Jahr aus (Althaus, 2012) sind Marginalbetrachtungen. Bei der Monetarisierung dieser Ergebnisse wie oben beschrieben resultieren deshalb Marginalkosten (Grenzkosten) je Fzkm/Jahr. Grenzkosten sind zwar aus ökonomischer Sicht für eine Bepreisung effizient und zu bevorzugen. Um eine Abschätzung der Gesamtkosten vorzunehmen, sind aber Durchschnittskosten notwendig. Beim Lärm sind die Durchschnittskosten in der Regel höher als die Grenzkosten. Das Verhältnis beider Kosten hängt von der Verkehrsmenge ab (Doll, 2018a). Auf Basis vorhandener Literatur zu Durchschnitts- vs. Grenzkosten des Lärms können jedoch die Durchschnittskosten aus den Grenzkosten abgeschätzt werden. Dies ist allerdings wiederum mit Unsicherheiten verbunden und nur für einen Durchschnittsfall möglich, weil das Verhältnis zwischen Grenz- und Durchschnittskosten stark variieren kann⁹. Basierend auf (Huijbregts et al., 2011) und

⁸ Es werden nur die verlorenen Lebensjahre bei den über 30-Jährigen berücksichtigt. Zum Ausschluss von Patienten und Todesfällen unter 30 Jahren wurde in Doll (2018) pauschal ein Korrekturfaktor von 0,8 auf die Prävalenzen der meisten Gesundheitsendpunkte angewandt, auch für die stark Belästigten (HA). Ausnahmen bilden spezifische Gesundheitsschäden bei Kindern (z. B. kognitive Einschränkungen).

⁹ Der angewendete Umrechnungsfaktor zwischen Grenz- und Durchschnittskosten hängt stark von der Verkehrsdichte auf einer Straße ab (und von weiteren Faktoren wie dem Raumtyp etc.). Auf Straßen und

(DG MOVE, 2019) wird hier ein Faktor von 1,7 angewendet (d. h. die Durchschnittskosten sind um 70 % höher als die Grenzkosten).

- ▶ Als Ergebnis resultieren durchschnittliche Lärmkosten pro Fzkm für die verschiedenen Verkehrsmittel, differenziert für verschiedene Straßentypen bzw. räumliche Situationen (innerorts, außerorts, Autobahn).
- ▶ Eine grobe Schätzung der Gesamtkosten für ganz Deutschland erfolgt auf Basis der resultierenden Durchschnittskosten und unter Anwendung von fahrzeugspezifischen Fahrleistungsdaten für die Kategorien innerorts, außerorts und Autobahn.

Zusammenfassend kann der Berechnungsweg mit folgender Formel beschrieben werden:

$$KD_{\text{tot}}^{ij} = BP^{ij} \cdot KBP \cdot f_{\text{Gesundheit}} \cdot f_{\text{DKGK}}$$

mit:

KD_{tot}^{ij} : Durchschnittskosten pro Fzkm für Fahrzeugkategorie i und räumliche Situation j [€/Fzkm]

BP^{ij} : Stark lärmbelästigte (HA) Personen pro Fzkm/Jahr für Fahrzeugkat. i und räuml. Situation j [P/Fzkm/Jahr]

KBP : Kosten pro stark lärmbelästigte (HA) Personen und Jahr [€/Person/Jahr], berechnet aus VLYL und DW, siehe oben

$f_{\text{Gesundheit}}$: Zuschlagsfaktor für die weiteren Kosten (Gesundheitskosten)

f_{DKGK} : Zuschlagsfaktor für die Umrechnung Grenzkosten/ Durchschnittskosten

Die beschriebene Hauptmethode basierend auf den Lärmwirkungsdaten pro Fzkm/Jahr aus (Althaus, 2012) hat folgende Vor- bzw. Nachteile:

- ▶ Ein Vorteil liegt darin, dass detailliert modellierte Werte differenziert nach Verkehrsmittel und räumlicher Situation verwendet werden und somit auf eine unsichere Allokation (wie sie bei einer Berechnung auf Basis von Gesamtkosten notwendig ist, vgl. Alternativmethode) verzichtet werden kann.
- ▶ Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die Monetarisierung in enger Anlehnung an die Methodenkonvention 3.0 des UBA erfolgt (gleiche Basis: Bewertung der Kosten durch Lärmbelästigung). Damit ist eine hohe Kohärenz mit der Methodenkonvention in Bezug auf die monetäre Bewertung gegeben.
- ▶ Ein Nachteil liegt darin, dass zur Umrechnung der modellierten Grenzkosten in Durchschnittskosten ein pauschaler Faktor verwendet werden muss.
- ▶ Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass die Grundlagendaten aus dem Lärmimmissionsmodell (Althaus, 2012) nicht aus Deutschland stammen. Wie gut die Ergebnisse auf Deutschland übertragbar sind, ist unklar.

zu Zeiten mit hoher Verkehrsdichte (viel Verkehr) sind die Grenzkosten gering und niedriger als die Durchschnittskosten. Auf Straßen mit geringer Verkehrsdichte (wenig Verkehr) sind die Grenzkosten deutlich höher als die Durchschnittskosten. Die hier verwendeten Werte basieren auf einem durchschnittlichen Betrachtungsfall bzgl. Verkehrsdichte.

Vorgehen alternative Methode: Umlage Gesamtlärmkosten

Als Alternative zu den mit der Hauptmethode ermittelten Kostensätzen werden die durchschnittlichen Lärmkosten mit einer zweiten Methode grob abgeschätzt. Diese Berechnung erfolgt basierend auf Belastetenzahlen (Anzahl lärm betroffener Personen) gemäß Umgebungslärmrichtlinie aus dem Jahr 2016. Unter Anwendung der Kostensätze der UBA-Methodenkonvention 3.0 (Umweltbundesamt, 2019a) können bundesweite Lärmkosten für den Straßenverkehr ermittelt werden. Mittels geeigneter Allokationsfaktoren können aus den Gesamtkosten verkehrsmittelspezifische fahrleistungsbezogene Durchschnittskosten abgeleitet werden.

Das Vorgehen besteht aus den folgenden Schritten:

- ▶ Zentrale Basis bilden die Belastetenzahlen (Anzahl lärm belasteter Personen differenziert nach dB-Klasse) durch Straßenverkehrslärm gemäß Umgebungslärmrichtlinie für das Jahr 2016. Diese Daten sind u. a. in der Methodenkonvention 3.0 enthalten (Umweltbundesamt, 2019a).
- ▶ Mit Hilfe der Kostensätze je lärm belasteter Person und Jahr differenziert nach dB-Klasse gemäß UBA-Methodenkonvention 3.0 (Umweltbundesamt, 2019a) können aus der Anzahl Lärm belasteter im Straßenverkehr die jährlichen bundesweiten Kosten des Straßenverkehrslärms berechnet werden.

Nun erfolgt der schwierigste Schritt, der mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist: Wie werden die Gesamtkosten den einzelnen Verkehrssituationen zugeordnet? In verschiedenen Studien zu den externen Kosten des Lärms hat sich folgende Allokationsmethode etabliert: Die Aufteilung der Gesamtkosten auf die Verkehrsmittel und die räumlichen Situationen erfolgt über die Fahrleistung sowie 'Allokationsfaktoren' nach folgender Formel:

$$\text{Kosten (V'mittel } i, \text{ räuml. Sit. } j) = \frac{\text{Fahrleistg.}_{ij} \cdot \text{Allokationsfaktor}_{ij}}{\sum_{ij} (\text{Fahrleistg.}_{ij} \cdot \text{Allokationsfaktor}_{ij})} \times \text{Gesamtlärmkosten}$$

mit:

i: Verkehrsmittel (Pkw, Motorräder, Lieferwagen, Lkw, Busse)

j: räumliche Situation (innerorts, außerorts, Autobahn)

Die Allokationsfaktoren berücksichtigen die unterschiedliche Emissionswirkung der verschiedenen Verkehrsmittel. In der vorliegenden Studie werden die gleichen Allokationsfaktoren verwendet, die auch im neusten "EU Handbook on external costs of transport v.3" (DG MOVE, 2019) angewendet werden. Dort werden auch die Lärmkosten (Gesamt- und Durchschnittskosten) analog wie in der hier beschriebenen Alternativmethode berechnet, d. h. auf Basis der gesamten Anzahl Lärm betroffenen nach Umgebungslärm-Richtlinie.

Die Tabelle 14 zeigt die Allokationsfaktoren, die in (DG MOVE, 2019) verwendet wurden. Die Allokationsfaktoren beziehen sich immer auf die Pkw, d. h. zeigen die Lärmwirkung der verschiedenen Verkehrsmittel im Vergleich zum Pkw (z. B. Lärmwirkung für 1 Fzkm eines Lkw im Vergleich mit 1 Fzkm eines Pkw).

Tabelle 14: Allokationsfaktoren für die Aufteilung der gesamten Lärmkosten auf die verschiedenen Fahrzeugkategorien (relativ zu Pkw: Faktor 1,0¹⁰)

Verkehrsmittel	Straßen innerorts (ca. 50 km/h)	Außerorts und Autobahnen (Straßen >80 km/h)
Pkw	1,0	1,0
Motorräder	13,2	4,2
Lieferwagen	1,5	1,2
Linienbusse ÖV	9,8	3,3
Reisebusse	9,8	3,3
Lkw	11,8	3,9

Quelle: (DG MOVE, 2019), basierend auf (Schroten et al., 2014) und (VROM, 2006)

Die **Allokationsfaktoren** basieren auf den Lärmemissionen der verschiedenen Verkehrsmittel bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Dazu wurden auf Basis der Vorgaben der niederländischen ‘Norm’ zur Berechnung von Lärmemissionen (VROM, 2006) die Lärmemissionen verschiedener Verkehrsmittel berechnet und in Relation zu den Pkw gesetzt. Bei höheren Geschwindigkeiten sind die Unterschiede zwischen den Verkehrsmitteln geringer als bei niedrigen Geschwindigkeiten innerorts, wo z. B. die Lärmemissionen von Lkw und Motorrädern mehr als zehnmal höher sind als die von Pkw. Die Allokationsfaktoren sind mit Unsicherheiten behaftet, u. a. weil sich die einzelnen Verkehrsmittel einer Kategorie teilweise stark unterscheiden und sich bzgl. Lärmemissionen laufend weiterentwickeln. Im Rahmen dieses Projekts ist es uns nicht möglich, diese Unsicherheiten zu quantifizieren.

Aus den bundesweiten Lärmkosten können mit Hilfe dieses Vorgehens die Kostenanteile je Verkehrsmittel und räumliche Situation berechnet und daraus schließlich Kostensätze für die durchschnittlichen Lärmkosten je Fzkm differenziert nach räumlichen Situationen abgeleitet werden. Dazu werden räumlich differenzierte Fahrleistungen je Verkehrsmittel verwendet (DG MOVE, 2019) (vgl. Tabelle 15). Diese Kostensätze können mit den Ergebnissen der Hauptmethode sowie anderen Studien verglichen werden.

¹⁰ Für die Allokationsfaktoren der verschiedenen räumlichen Situationen werden für Pkw (als absolute Referenz) folgende Gewichtungen verwendet, um die Fahrleistungen der einzelnen räumlichen Situationen vergleichen (gewichten) und summieren zu können: Pkw innerorts: 1,00, Pkw außerorts: 0,26, Pkw Autobahnen: 0,09 (Quelle: DG MOVE 2019 bzw. CE Delft & VU 2014).

Tabelle 15: Fahrleistungen in Deutschland (2016) nach räuml. Situationen, in Mio. Fzkm/Jahr

Verkehrsmittel	innerorts	außerorts	Autobahnen
Pkw	156.890	238.240	185.944
Motorräder	4.902	9.488	1.423
Lieferwagen	15.540	11.017	10.443
Linienbusse ÖV	823	548	72
Reisebusse	233	1.147	564
Lkw	8.016	10.504	9.122

Quelle: DG MOVE (2019)

Die beschriebene Alternativmethode basierend auf der Anzahl Lärmbetroffener nach Umgebungslärm-Richtlinie und einer Schätzung der bundesweiten Lärmkosten nach der Methodenkonvention 3.0 hat folgende Vor- bzw. Nachteile:

- ▶ Ein Vorteil liegt darin, dass die Berechnung auf originären Werten aus Deutschland (Anzahl von Lärm betroffener Personen) basiert.
- ▶ Die Monetarisierung ist kohärent mit den Kostensätzen gemäß UBA-Methodenkonvention 3.0 (UBA 2019).
- ▶ Der Nachteil liegt bei den erheblichen Unsicherheiten, die mit der Allokation auf die Verkehrsmittel verbunden sind.

Die Ergebnisse der Abschätzung der fahrleistungsspezifischen Lärmkosten – nach Hauptmethode und alternativer Berechnung – finden sich am Ende des Kapitels 4.2.5 (Umweltkosten).

3 Methoden der ökologischen Bilanzierung

3.1 Eigenschaften der Verkehrsarten

Als Basis für die Ermittlung der Umweltwirkungen in den verschiedenen Betrachtungsebenen werden zunächst die grundsätzlichen Eigenschaften der Verkehrsarten und der verwendeten Verkehrsmittel beschrieben, die für den ökologischen Verkehrsartenvergleich relevant sind.

Grundsätzliche Eigenschaften und Kenngrößen, die für den ökologischen Verkehrsartenvergleich relevant sind, sind in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: Wichtige Eigenschaften der Verkehrsmittel im Verkehrsartenvergleich

Bezugsgröße	Verwendung im Verkehrsartenvergleich
Fahrzeugkenngrößen statisch	
Leergewicht	Aktivitätsfaktor Fahrzeugbereitstellung, Allokation Infrastrukturbereitstellung
Kapazität	Allokation Verkehrsleistung
Materialzusammensetzung	Fahrzeugherstellung, Wirkungsindikator KRA
Standfläche der Fahrzeuge	Allokation Infrastruktur, Allokation Flächenbelegung
Fahrzeugkenngrößen dynamisch	
Laufleistung pro Jahr	Allokation Fahrzeugherstellung
Mittlere Lebensdauer	Allokation Fahrzeugherstellung
Betriebskenngrößen	
Auslastung	Allokation Verkehrsleistung
Energieverbrauch	Allokation Energiebereitstellung, Wirkungsindikator kraftstoffabhängige THG- und Luftschadstoffemissionen, Wirkungsindikator KEA
Fahrleistung	Allokation Fahrzeugbereitstellung, Allokation Infrastrukturbereitstellung, Aktivitätsfaktor für Umweltwirkungen
Geschwindigkeit	Allokation Flächenbelegung
Auspuffemissionen	Wirkungsindikator verbrennungsbedingte THG- und Luftschadstoffemissionen
Sonstige Emissionen	Abrieb (hier nicht quantifiziert), Lärm (nur indirekt quantifiziert bei Umweltkosten)

3.1.1 Grundsätzliche Eigenschaften der Verkehrsarten

Die verschiedenen Verkehrsarten erfüllen jeweils unterschiedliche Transportaufgaben und sind in der Regel für diese optimiert. Dementsprechend sind sie unterschiedlich ausgestaltet, zum Beispiel was Größe oder verfügbaren Raum, maximale Geschwindigkeit oder Antriebsart betrifft.

Trotz der großen Vielfalt an Einflussgrößen, die wiederum unterschiedliche Ergebnisse begründen kann, gibt es einige generalisierende Aussagen, die den Energieverbrauch und die luftgetragenen Emissionen von motorisierten Verkehrsmitteln charakterisieren:

Ein Fahrzeug verbraucht mit zunehmendem Gewicht wegen des mit der Masse proportional ansteigenden Steigungs-, Beschleunigungs- und Rollwiderstandes mehr Energie.

Die Fahrzeugmasse geht als Parameter direkt proportional in den Steigungs-, Beschleunigungs- und Rollwiderstand ein. In den Verkehrssituationen Stadtverkehr, Nahverkehr und Rangieren ist die Fahrzeugmasse die wichtigste Einflussgröße auf den Energieverbrauch. Nach (Friedrich, 2002) ist bei einem VW-Golf die Fahrzeugmasse für 88 % des gesamten Fahrwiderstandes im Stadtverkehrszyklus verantwortlich.

In (Helms, H., et al. 2003) werden die Primärenergieeinsparungen – also Einsparungen am Fahrzeug und in der Energiebereitstellungskette – durch Reduktion des Fahrzeuggewichtes abgeschätzt. Danach erreichen bei einem Fahrbetrieb, der der jeweiligen bundesdurchschnittlichen Nutzung entspricht, diejenigen Verkehrsmittel die höchsten Einsparungen, die massenbezogen einen hohen spezifischen Verbrauch haben (wie z. B. Standard-Pkw) und/oder sehr spezielle Fahrbedingungen mit häufigen Beschleunigungen aufweisen (wie z. B. U-Bahnen und Regionalzüge).

Ein Fahrzeug verbraucht mit zunehmender Geschwindigkeit wegen des mit der Geschwindigkeit quadratisch ansteigenden Luftwiderstandes mehr Energie.

Bei hohen Geschwindigkeiten und geringeren Beschleunigungsvorgängen (Außerortsverkehr, Fernverkehr) wird der Luftwiderstand, der durch die Geschwindigkeit und die aerodynamische Form des Fahrzeuges bestimmt wird, zum wichtigsten Einflussfaktor auf den Energieverbrauch. Er ist beispielsweise bei einem Pkw bei einer Konstantfahrt mit 120 km/h für 75 % des gesamten Fahrwiderstandes verantwortlich; die Masse nur noch für 25 % (Friedrich, 2002).

Im Schienenverkehr gilt ähnliches: Bei einem Halteabstand von 300 km und einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 60 km/h liegt bei einem Güterzug der Anteil des Luftwiderstandes am Endenergieverbrauch bei 34 %, bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 120 km/h bei 65 % (Ilgmann, 1998).

Der Kraftstoffverbrauch eines Pkw steigt um knapp 30 %, wenn er mit einer konstanten Geschwindigkeit von 120 km/h statt von 90 km/h betrieben wird, ein Güterzug verbraucht dann rund 40 % mehr; er hat u.a. wegen der größeren Stirnfläche einen größeren Luftwiderstand als der Pkw.

Ein Fahrzeug ist dann energetisch günstiger, wenn es einen geringeren Rollwiderstand aufweist.

Der Rollwiderstand wird neben dem Gewicht des Fahrzeuges von dem verkehrsmitteltypischen Rollwiderstandsbeiwert beeinflusst. So hat der Übergang von Rad zu Schiene einen Rollwiderstandskoeffizienten – definiert in N/kN – von rund 0,1 bis 0,2 %, derjenige von Reifen zu Straße bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen hingegen liegt bei 1,0 bzw. 1,3 % und der moderner schwerer Lkw bei rund 0,5 % (UBA, 2002). Die Konsequenzen sind deutliche betriebliche Einschränkungen vor allem wegen der langen Bremswege, aber auch wegen der schlechten Steigfähigkeit. Daher muss mit großen Abständen gefahren werden und Strecken mit vielen Kunstbauten (Brücken, Tunnel, etc.) erstellt werden. Daraus ergibt sich eine schlechte Flächeneffizienz sowie im Vergleich zu Straßen um ein Vielfaches höhere Bau- und Betriebskosten der Strecken. Beides ist umweltrelevant.

In der Praxis überlagern sich die verschiedenen Einflüsse.

Zum unterschiedlichen Rollwiderstand von Straßen- und Schienenverkehr kommt der unterschiedliche Luftwiderstand. Bei einer angenommenen Fahrt mit konstanter

Geschwindigkeit von 80 km/h liegt er nach (Rauschenberg, 1999) im Straßengüterverkehr etwa gleich hoch wie der Rollwiderstand. Er ist bei einem Güterzug wegen der insgesamt guten Aerodynamik um den Faktor 10 niedriger. Für diese Verkehrssituation schätzt Rauschenberg den Fahrwiderstand eines großen Lkw um das 4-5-fache höher ein als denjenigen eines Güterzuges.

Neben dem Luftwiderstand steigt mit der Zunahme der Geschwindigkeit die zum Erreichen dieser Geschwindigkeit notwendige Beschleunigungsarbeit, die wiederum von der Fahrzeugmasse abhängt. So verdoppelt sich der Energieverbrauch von Güterzügen (Beispiel Containerzug mit elektrischer Traktion), wenn mit einer Regelgeschwindigkeit von 140 km/h statt von 80 km/h gefahren wird (Ilgmann, 1998).

Ein Fahrzeug ist dann energetisch günstiger, wenn es für seinen Einsatzzweck eine günstigere Antriebsart aufweist.

So werden Taxis insbesondere auch aus Verbrauchsgründen überwiegend mit Dieselmotoren angetrieben, weil sie gegenüber Otto-Pkw bei geringen Motorlasten (Stadtverkehr, Leerlauf) bessere Wirkungsgrade aufweisen. Elektro-Pkw sind in den Möglichkeiten der Abschaltung des Motors im Stand und der Bremsenergieerückspeisung prinzipiell den Kraftstoff betriebenen Pkw überlegen.

Ein Fahrzeug ist dann ökologisch günstiger, wenn es mit einem über die gesamte Energiekette günstigeren Energieträger betrieben wird.

Beim Elektroantrieb wird die Energie in der Regel über eine Oberleitung an der Trasse oder eine Batterie zugeführt. Bei der Herstellung der Elektrizität gibt es hohe Umwandlungsverluste im Kraftwerk, die nur zum Teil durch Kraft-Wärme-Kopplung vermindert werden können. Der Elektroantrieb im Fahrzeug selbst weist hohe Wirkungsgrade auf und ermöglicht beim Bremsen die Energierückspeisung. Luftgetragene verbrennungsbedingte Emissionen entstehen im Kraftwerk bzw. während der vorgelagerten Prozesskette, nicht lokal am Fahrzeug. Bei der Speicherung des Stroms in einer Batterie im Fahrzeug entstehen zusätzliche Umwandlungsverluste und ein Mehrverbrauch durch das Batteriegewicht.

Beim Antrieb mit Verbrennungsmotor wird der Kraftstoff im Fahrzeug mitgeführt. Die energetischen Verluste der Kraftstoffherzeugung in der Raffinerie sind gering, hoch hingegen im Motor. Dort entstehen die luftgetragenen Emissionen, deren Höhe u. a. durch das Verbrennungskonzept (Otto, Diesel), den technischen Minderungsstandard und die Fahrweise bestimmt werden.

Primärenergetisch und in den klimarelevanten Emissionen ist die elektrische Antriebskette tendenziell – aber nicht immer – günstiger als der direkte Antrieb mit Kraftstoffen – zu unterschiedlich sind die Einsatzzwecke der zu vergleichenden Fahrzeuge. Die Bilanz der Luftschadstoffemissionen ist bei den elektrisch betriebenen Fahrzeugen meist günstiger als bei den direkt verbrennenden. Dieser Vergleich kann sich bei sehr modernen Straßenfahrzeugen und einem Kraftwerkspark mit fossilen Brennstoffen und unzureichender Schadstoffminderung jedoch umkehren.

Basieren die Energieträger jedoch auf regenerativen Energien, sollte sich dieser Vorteil über die gesamte Erzeugungs- und Umwandlungskette bis hin zur Nutzung im Fahrzeug bemerkbar machen. Energetische und infrastrukturelle Vorleistungen und eventuell reduzierte Gesamtwirkungsgrade infolge vermehrter Umwandlungsprozesse sind dabei zu berücksichtigen.

Ein Fahrzeug ist – bezogen auf den potenziellen Nutzen („spezifisch“) – ökologisch günstiger, wenn das Verhältnis von Eigengewicht zu Nutzlast kleiner ist.

Die Basisausstattung eines motorisierten Fahrzeuges mit Karosserie, Motor, Getriebe und der gesamten weiteren technischen Ausstattung nimmt von vorneherein viel Masse und Raum ein. Dementsprechend ist die Masse eines kleineren Verkehrsmittels bezogen auf den Nutzen – das ist der angebotene Platz (in Personen) oder die Ladekapazität (in Tonnen oder Volumen) – im Normalfall größer als bei einem größeren Verkehrsmittel. Im spezifischen Verbrauch je angebotenem Platz- bzw. Tonnen-Kilometer ist es somit schlechter als ein großes.

Ein mittlerer Diesel-Pkw wiegt rund 380 kg pro Sitzplatz und verbraucht im Stadtverkehr rund 65 MJ Diesel je 100 Platzkilometer (Platzkm). Ein Stadtbus ist für Sitz- und Stehplätze ausgelegt; er kommt je Platz auf rund 170 kg Basisgewicht und verbraucht rund 22 MJ Diesel je 100 Platzkm, liegt also bei 1/3 des Pkw-Verbrauchs.

Schließlich wird ein Fahrzeug – bezogen auf den realen Nutzen („spezifisch“) – ökologisch günstiger betrieben als ein anderes, wenn es besser ausgelastet ist.

Dieses gilt bekanntlich uneingeschränkt innerhalb einer Fahrzeugklasse, aber auch zwischen verschiedenen Fahrzeugklassen. So benötigt der Stadtbus beim Betrieb mindestens eine Auslastung von 33 %, um dem Kraftstoffverbrauch eines voll besetzten mittleren Diesel- Pkw gleich zu kommen.

3.1.2 Eigenschaften der Verkehrsarten im Personenverkehr

Der Personenverkehr lässt sich nach nicht-motorisiertem und motorisiertem Verkehr unterscheiden. Neue Fortbewegungskonzepte wie Pedelec und E-Tretroller passen allerdings nicht mehr in dieses Schema, daher spricht man z. B. in der Schweiz vom „Langsamverkehr“ und meint damit den Fuß- und Fahrradverkehr einschließlich der Pedelecs mit einer Motorunterstützung bis zu 25 km/h und E-Tretroller (Höchstgeschwindigkeit bis 20 km/h). Weitere Unterscheidungsmerkmale sind Individualverkehr (mit eigenen oder „geliehenen“ – z. B. Carsharing – Fahrzeugen) und öffentlicher Verkehr. Personenverkehr findet auf Straße, Schiene, Wasser und in der Luft statt. In diesem Verkehrsartenvergleich wird eine Auswahl relevanter Verkehrsarten und Verkehrsmittel betrachtet. Ausgeklammert wird der gesamte Bereich der wassergebundenen Verkehre, ebenso spezielle Transportmittel wie Seilbahnen und touristische Bahnen.

Im Folgenden werden die wichtigsten für den ökologischen Verkehrsartenvergleich relevanten Eigenschaften der betrachteten Verkehrsarten beschrieben.

Fußverkehr

Der Fußverkehr ist die natürlichste Fortbewegungsart des Menschen, die prinzipiell ohne weitere Hilfsmittel auskommt. Fußwege haben einen hohen Anteil an der Personenmobilität: Nach der Untersuchung „Mobilität in Deutschland MID“ (Nobis, 2019) wurden in Deutschland im Jahr 2017 56 Millionen Wege und 93 Millionen Personenkilometer pro Tag zu Fuß erbracht. Das ist ein Anteil von 20 % an den Wegen und 3 % an der Verkehrsleistung im Personenverkehr.

Der Fußverkehr hat prinzipiell sehr geringe ökologische Wirkungen. In Betracht kommen Folgewirkungen durch

- ▶ die Abnutzung von Schuhen und Kleidung,
- ▶ der erhöhte Kalorienumsatz durch Bewegung und
- ▶ die Bereitstellung der Infrastruktur für den Fußgängerverkehr.

Die Abnutzung von Schuhen und Kleidung sowie der Kalorienumsatz wären prinzipiell bilanzierbar. Allerdings müsste das konsequenterweise dann bei allen Verkehrsarten berücksichtigt werden, da die Nutzung anderer Verkehrsarten ebenfalls mit einer Abnutzung von Kleidung und Kalorienumsatz einhergeht. Darüber hinaus ist die Zurechnung des über den Grundumsatz hinausgehenden Kalorienverbrauchs durch Fortbewegung, Sport oder körperliche Arbeit nicht sinnvoll, da körperliche Bewegung aus medizinischer Sicht generell positiv anzusehen ist. Daher schlagen wir vor, die ökologischen Wirkungen von Ernährung und Kleidung grundsätzlich nicht im Sektor Verkehr zu bilanzieren.

Fußgänger nutzen in der Regel eine eigene Infrastruktur. Allerdings liegen uns, anders als für die Straßen-, Schienen-, und Flugplatzinfrastruktur, keine Daten vor, um die Umweltwirkungen der Infrastrukturbereitstellung für Fußgänger zu quantifizieren (siehe Kapitel 2.3.4).

Für den Fußgängerverkehr werden daher im Rahmen dieses Verkehrsartenvergleichs keine ökologischen Wirkungen quantifiziert.

Fahrradverkehr

Fahrradfahren gehörte bisher zu den nicht-motorisierten Fortbewegungsarten. Mit der Einführung von elektrisch unterstützten Pedelecs hat sich das geändert. Die „langsamen“ Pedelecs mit einer Motorunterstützung bis 25 km/h werden verkehrlich (bei Zulassung und Straßenverkehrsordnung) wie Fahrräder behandelt. Seit Mitte 2019 gibt es außerdem mit dem E-Tretroller ein neues Verkehrsmittel, das in Deutschland in der Straßenverkehrsordnung ähnlich wie ein Fahrrad behandelt wird, insbesondere besteht Radwegbenutzungspflicht und die Benutzung von Gehwegen ist verboten.

Nach der Untersuchung „Mobilität in Deutschland (MID)“ (Nobis, 2019) wurden in Deutschland im Jahr 2017 28 Millionen Wege und 112 Millionen Personenkilometer pro Tag mit dem Fahrrad zurückgelegt. Das ist ein Anteil von 10 % an den Wegen und 3 % an der Verkehrsleistung im Personenverkehr. Etwa 5 % der Fahrradfahrten wurden 2017 mit Pedelecs erbracht. Der Anteil an der Verkehrsleistung ist höher, da die mittlere Wegstrecke für Fahrräder bei 3,7 km, für Pedelecs bei 6,1 km lag. E-Tretroller gab es 2017 noch nicht. In diesem Verkehrsartenvergleich werden E-Tretroller trotzdem im Rahmen eines Betrachtungsfalls behandelt (siehe Kapitel 4.3.5).

Beim Fahrradverkehr sind – unter Vernachlässigung der Kleidung und des Kalorienumsatzes wie beim Fußverkehr – die folgenden ökologischen Wirkungen relevant:

- ▶ der Energiebedarf der Motorunterstützung (bei Pedelecs und E-Tretrollern),
- ▶ die Bereitstellung der Fahrzeuge und
- ▶ die Bereitstellung der Infrastruktur.

Diese werden in diesem Verkehrsartenvergleich quantifiziert. Bei der Infrastruktur besteht allerdings die Einschränkung, dass, wie beim Fußgängerverkehr, keine belastbaren Informationen über das Radwegenetz vorliegen. Daher wird der Fahrradverkehr in der Status quo-Betrachtung für Deutschland unter der Annahme bilanziert, dass alle Fahrradfahrten auf den Straßen stattfinden. Dies bedeutet, dass die ökologischen Wirkungen des Fahrradverkehrs eher unterschätzt werden.

Zur Allokation der ökologischen Wirkungen der Fahrzeugbereitstellung auf die Fahrleistung muss die Lebensfahrleistung der Fahrzeuge ermittelt werden. Hierfür werden verschiedene Quellen verwendet:

- ▶ Der Zweirad-Industrie-Verband (ZIV, 2018a) berichtet für das Jahr 2017 den Verkauf von 3,13 Mio. Fahrrädern und 720.000 Pedelecs. Der Bestand in Deutschland wird mit 70 Mio. Fahrrädern und 3,5 Mio. Pedelecs angegeben. Im Jahr 2018 stiegen die Verkäufe auf 3,2 Mio. Fahrräder und 0,98 Mio. Pedelecs. Der Bestand wuchs dabei auf 71 Mio. Fahrräder und rund 4,5 Mio. Pedelecs. Eigene Angaben zu jährlichen Fahrleistungen und Lebens- bzw. Nutzungsdauer von Fahrrädern macht der Verband nicht.
- ▶ In der MID (Nobis, 2019) wurde für 2017 ein Fahrzeugbestand von 73 Mio. Fahrrädern und 4 Mio. Pedelecs ermittelt. Das liegt etwas über den Angaben des ZIV. Zur Quantifizierung der Fahrleistungen können die oben bereits dargestellten Verkehrsleistungen pro Tag und die mittleren Distanzen der Fahrräder und Pedelecs herangezogen werden. Angaben zu Lebensdauern von Fahrrädern sind nicht enthalten.
- ▶ In der Studie „Pedelection“ (Lienhop et al., 2015) wurde die jährliche Fahrleistung von Pedelecs mit 2.500 km pro Fahrzeug ermittelt. Die Bandbreite (25 % bzw. 75 % Perzentil) liegt zwischen 1.000 km und 3.500 km pro Jahr. Bei einer angenommenen Lebensdauer von sechs Jahren wird die Lebensfahrleistung der Pedelecs zwischen 6.000 km und 21.000 km angenommen, im Mittel 15.000 km.

In diesem Verkehrsartenvergleich wird die Lebensfahrleistung der Fahrräder und Pedelecs für die Status quo-Betrachtung folgendermaßen abgeschätzt:

Aus den Verkaufs- und Bestandszahlen des ZIV (rund 3 Mio. Verkäufe bei 71 Mio. Fahrzeugen im Bestand) lässt sich aus dem Quotienten grob die Lebensdauer der Fahrräder abschätzen: Eine vollständige Erneuerung der Fahrzeugflotte wäre theoretisch nach rund 23 Jahren abgeschlossen. Eine mittlere Lebensdauer der Fahrräder von über 20 Jahren erscheint daher realistisch. Allerdings muss davon ausgegangen werden, dass in einem so langen Fahrradleben viele Teile z.T. mehrmals ausgetauscht werden, deswegen wird ein entsprechender Wartungsaufwand (Ersatz von Reifen, Sattel sowie Austausch weiterer Verschleißteile) angesetzt.

Die mittlere Tagesfahrleistung der Fahrräder und Pedelec lag nach der MID 2017 bei 112 Mio. Personenkilometern pro Tag. Eine Hochrechnung auf ein Jahr ergibt eine Verkehrs- bzw. Fahrleistung von rund 41 Mrd. Kilometern. Bezogen auf den Bestand von 77 Mio. Fahrrädern und Pedelecs läge dann die mittlere Jahresfahrleistung bei 530 km je Fahrzeug und Jahr. Bei einer mittleren Lebensdauer von 23 Jahren ergibt sich daraus eine Lebensfahrleistung von über 12.000 km pro Fahrzeug.

Wird die mittlere Jahresfahrleistung der Fahrräder und Pedelecs aus der MID aufgeteilt, ergibt sich bei Verwendung des Pedelec-Anteils von 5 % an den Wegen und den mittleren Distanzen von 3,7 km für das Fahrrad und 6.1 km für das Pedelec eine mittlere Jahresfahrleistung für die Fahrräder von knapp 500 km und für die Pedelec von knapp 800 km. Dies ist deutlich weniger als in Pedelection als Mittelwert angegeben wird. Allerdings ist der Schwerpunkt der MID die Alltagsmobilität, so dass Urlaubsfahrten tendenziell unterschätzt werden. Außerdem gibt es in der MID keine Angaben zur Lebensdauer von Pedelecs.

Aufgrund der Unsicherheiten in den Basisdaten werden in diesem Verkehrsartenvergleich Lebenslaufleistungen abgeschätzt, die von einer regelmäßigen Nutzung der Fahrzeuge ausgehen und nicht die Lebensdauer, sondern die Nutzungsdauer zugrunde legen: Die mittlere Jahresfahrleistung der Pedelecs von 2.500 km pro Jahr aus Pedelection wird als Basis verwendet. Die mittlere Jahresfahrleistung der Fahrräder wird mit 1.500 km abgeschätzt, was in

etwa dem Längenunterschied der Wege entspricht, die in MID ermittelt wurde. Die effektive Nutzungsdauer von Pedelecs wird auf zehn Jahre geschätzt. Dies liegt über den sechs Jahren, die in Pedelection angenommen wurden, erscheinen aber aufgrund eigener Erfahrungen für ein gutes Pedelec problemlos erreichbar zu sein. Für das Fahrrad wird die gleiche Nutzungsdauer von 10 Jahren angenommen. Die Lebenslaufleistungen, die hier zugrunde gelegt werden, liegen dann bei 15.000 km für das Fahrrad, das ist etwas mehr als die aus der MID abgeschätzte Lebenslaufleistung von 12.000 km, und 25.000 km für das Pedelec.

Motorisierter Individualverkehr (Kleinkrafträder, Krafträder, Pkw)

Der motorisierte Individualverkehr hat mit Abstand den höchsten Anteil an den Verkehrsleistungen im Personenverkehr. Nach „Verkehr in Zahlen“ (Radke, 2018) waren es 2017 950 Mrd. Pkm, was einem Anteil an der Gesamtverkehrsleistung des binnenländischen Personenverkehrs von 79 % entspricht. Der Pkw-Verkehr hat daran wiederum den höchsten Anteil: In der TREMOD-Berechnung für den Inlandsverkehr teilt sich die Verkehrsleistung im Verhältnis 98,4 % zu 0,5 % zu 1,1 % auf Pkw, Kleinkrafträder bzw. Mopeds und Krafträder auf. Krafträder und Pkw werden für alle Arten von Fahrzwecken und Distanzen eingesetzt, Kleinkrafträder eher im Nahbereich.

Im Verkehrsartenvergleich werden diese drei Fahrzeugarten weiter nach den 2017 relevanten Technologien unterschieden. Bei den Mopeds erlaubt die aktuelle Datenlage für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor nur die Berücksichtigung von 2-Takt-Fahrzeugen.

Die im Verkehrsartenvergleich verwendeten Kennzahlen für die Verkehrsmittel des Straßenverkehrs sind überwiegend im TREMOD-Modell berücksichtigt. Es handelt sich um folgende Werte:

- ▶ **Leergewicht je Fahrzeug und Antriebstechnologie:** bei den Pkw eigene Auswertung des Bestandsdatensatzes, der vom KBA für die Verwendung in TREMOD zur Verfügung gestellt wird (KBA, n.d.). Bei den Krafträdern und Kleinkrafträdern werden die Default-Werte der für die Ermittlung der ökologischen Wirkungen der Fahrzeugbereitstellung überwiegend verwendeten Datenbank ecoinvent (Hischier et al., 2010) verwendet.
- ▶ **Nutzungsdauer der Fahrzeuge:** Eigene Abschätzung auf Basis der Altersverteilungen im Fahrzeugbestand nach der KBA-Statistik. Eine mögliche weitere Nutzung der Fahrzeuge außerhalb Deutschlands bleibt damit unberücksichtigt, da dazu im Rahmen dieser Studie keine Recherchen durchgeführt werden konnten.
- ▶ **Mittlere Jahresfahrleistung je Antriebstechnologie:** Auswertung der Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al., 2016) für TREMOD, umgerechnet auf den Fahrzeugbestand und die Fahrleistungen 2017.
- ▶ **Kapazität:** Abschätzung unter der Annahme, dass die tatsächlich nutzbare Platzzahl im Pkw wegen nicht vorhandener oder für große und kräftige Personen bzw. wegen Gepäcktransport nur eingeschränkt nutzbarer Rückbank im Schnitt geringer ist als die standardmäßig vorhandenen 5 Plätze eines üblichen Pkw.

Carsharing

Nach der MID (Nobis / Kuhnimhof, 2019) haben die Verkehrsleistungen im Carsharing bislang nur einen sehr geringen Anteil an der gesamten Personenverkehrsleistung. Im Rahmen des Verkehrsartenvergleichs wurde geprüft, ob ein Betrachtungsfall zum Carsharing aufgenommen

wird, da verschiedene Studien zur Nutzung von Carsharing vorliegen. Es wurde dann verworfen, da mit der Nutzung von Carsharing mehr oder weniger die gleichen Umweltwirkungen verbunden sind wie bei der privaten Pkw-Nutzung und somit eine Abschätzung der ökologischen Vor- oder Nachteile des Carsharing stärker ins Detail gehen müsste als hier im Rahmen der Betrachtungsfälle möglich.

Öffentlicher Straßenpersonennahverkehr (Busse, Straßen-, Stadt und U-Bahnen)

Beim öffentlichen Personennahverkehr werden in diesem Verkehrsartenvergleich der städtische und regionale Linienbusverkehr sowie der überwiegend städtische Verkehr mit Straßen-, Stadt- und U-Bahnen betrachtet. Der Linienbusverkehr hatte 2017 mit 37,5 Mrd. Pkm (DESTATIS, 2019) einen Anteil von 3,1 % an der Verkehrsleistung im inländischen Personenverkehr die Straßen-, Stadt und U-Bahnen mit 17,7 Mrd. Pkm einen Anteil von 1,5 % (VDV, 2018).

Die im Verkehrsartenvergleich verwendeten Kennzahlen für die Verkehrsmittel des öffentlichen Personennahverkehrs sind überwiegend im TREMOD-Modell (Knörr et al., 2019) berücksichtigt. Es handelt sich um folgende Werte:

- ▶ **Leergewicht:** bei den Linienbussen eigene Auswertung des Bestandsdatensatzes, der vom KBA (KBA, n.d.) für die Verwendung in TREMOD zur Verfügung gestellt wird. Bei den Straßen-, Stadt und U-Bahnen die Default-Werte der für die Ermittlung der ökologischen Wirkungen der Fahrzeugbereitstellung überwiegend verwendeten Datenbank ecoinvent (Hischier et al., 2010). Diese Default-Werte wurden an das in der VDV-Statistik (VDV, 2018) angegebenen Platzangebot angepasst.
- ▶ **Nutzungsdauer der Fahrzeuge:** eigene Abschätzung für die Linienbusse auf Basis der Altersverteilungen im Fahrzeugbestand nach der KBA-Statistik. Für die Straßen-, Stadt- und U-Bahnen wurde der Wert aus Renewbility III (Zimmer et al., 2016) übernommen, da seitens des VDV kein genauere Wert ermittelt werden konnte.
- ▶ **Mittlere Jahresfahrleistung:** für die Linienbusse Auswertung der Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al., 2016) und der Fahrleistungen von TREMOD, umgerechnet auf den Fahrzeugbestand und die Fahrleistungen 2017. Bei den SSU-Bahnen konnten die mittleren Fahrleistungen aus der VDV-Statistik aus den angegebenen Gesamtfahrleistungen und Beständen rückgerechnet werden.
- ▶ **Kapazität:** Für die Linienbusse wurde eine Abschätzung aus den Angaben für einzelne Bustypen und den Angaben aus den Erhebungen nach (DESTATIS, 2019) vorgenommen. Bei den Bahnen konnten die Werte aus der VDV-Statistik (Platzkilometer und Fahrzeugkilometer) rückgerechnet werden.

Schiienenpersonennahverkehr (SPNV)

Im Nahverkehr mit Eisenbahnen wurden im Jahr 2017 54,9 Mrd. Pkm erbracht, davon 76 % von der DB AG und 24 % von anderen Bahnunternehmen. Insgesamt 79 % der Verkehrsleistung wurde mit Elektrotraktion und dementsprechend 21 % mit Dieseltraktion erbracht. Der Nahverkehr der Eisenbahnen hatte damit einen Anteil von 4,7 % an der inländischen Personenverkehrsleistung.

Die im Verkehrsartenvergleich verwendeten Kennzahlen für die Verkehrsmittel des Personennahverkehrs mit Eisenbahnen sind überwiegend im TREMOD-Modell (Knörr et al., 2019) berücksichtigt. Es handelt sich um folgende Werte:

- ▶ **Leergewicht:** Persönliche Auskunft (DB AG, 2019) und DB-Zahlen für TREMOD (DB Umwelt, 2019)
- ▶ **Nutzungsdauer der Fahrzeuge:** DB AG persönliche Auskunft
- ▶ **Mittlere Jahresfahrleistung:** DB AG persönliche Auskunft
- ▶ **Kapazität:** Kennzahlen der DB AG für TREMOD und VDV-Statistik (VDV, 2018)

Schienenpersonenfernverkehr (SPFV)

Der Eisenbahnpersonenfernverkehr wird fast ausschließlich mit ICE- und IC-Zügen der DB AG erbracht. Im Jahr 2017 waren es 40,4 Mrd. Pkm, davon 40,3 Mrd. Pkm von der DB AG, davon wiederum 1,6 % mit Dieseltraktion. Dies entspricht einem Anteil am gesamten inländischen Personenverkehr von 3,4 %.

Die im Verkehrsartenvergleich verwendeten Kennzahlen für die Verkehrsmittel des Personenfernverkehrs mit Eisenbahnen sind überwiegend im TREMOD-Modell (Knörr et al., 2019) berücksichtigt. Es handelt sich um folgende Werte:

- ▶ **Leergewicht:** DB-Kennzahlen zu Zugkilometern und Bruttotonnenkilometern für TREMOD (DB Umwelt, 2019)
- ▶ **Nutzungsdauer der Fahrzeuge:** Annahmen von Renewbility III (Zimmer et al., 2016)
- ▶ **Mittlere Jahresfahrleistung:** Renewbility III
- ▶ **Kapazität:** Kennzahlen der DB AG für TREMOD und VDV-Statistik

Personenfernverkehr mit Bussen

Der Personenfernverkehr mit Bussen wird unterschieden in den Linienfernverkehr und den Gelegenheitsverkehr. Im Fernlinienbusverkehr wurden 2017 im Inland 4,6 Mrd. Pkm erbracht, das sind 0,4 % der gesamten Personenverkehrsleistung. Im Gelegenheitsverkehr waren es 12 Mrd. Pkm, davon 11 Mrd. Pkm im Fernverkehr (DESTATIS, 2019).

Die im Verkehrsartenvergleich verwendeten Kennzahlen für die Verkehrsmittel des Fernbusverkehrs sind überwiegend im TREMOD-Modell berücksichtigt. Es handelt sich um folgende Werte:

- ▶ **Leergewicht:** bei den Linienbussen des Fernverkehrs eigene Auswertung der Bestandsdatensatzes, von KBA (KBA, n.d.) sowie interne Daten der Firma Flixbus (Flixbus, 2019). Für Busse des Gelegenheitsverkehrs liegen keine Informationen vor. Daher wurde der Busbestand der KBA-Bestandstatistik nach Abzug der Liniennah- und Linienfernbusse („Sonstige Busse“) als Grundlage für die Auswertung des Leergewichts im Gelegenheitsverkehr verwendet.
- ▶ **Nutzungsdauer der Fahrzeuge:** eigene Abschätzung auf Basis der Altersverteilungen im Fahrzeugbestand nach der KBA-Statistik für „sonstigen Busse“; bei den Fernlinienbussen wurde eine Nutzungsdauer von vier Jahren angenommen. Aufgrund der hohen Jahresfahrleistung wird in dieser Zeit eine sehr hohe Lebenslaufleistung von 720.000 km erreicht.

- ▶ **Mittlere Jahresfahrleistung:** Auswertung der Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al., 2016) und der Fahrleistungen von (Flixbus, 2019) für TREMOD, umgerechnet auf den Fahrzeugbestand und die Fahrleistungen 2017.
- ▶ **Kapazität:** Abschätzung aus den Angaben für einzelne Bustypen und den Angaben aus den Erhebungen nach(DESTATIS, 2019). Beim Fernlinienbusverkehr Abgleich mit den Angaben von (Flixbus, 2019).

Flugverkehr

Im nationalen Flugverkehr (Verkehr zwischen innerdeutschen Flugplätzen wurden 2017 10,3 Mrd. Pkm erbracht, das entspricht einem Anteil von 0,9 % am Personenverkehr in Deutschland.

Im Verkehrsartenvergleich wird zusätzlich der abgehende internationale Flugverkehr berücksichtigt (Start in Deutschland und Landung auf ausländischen Flughäfen unter Berücksichtigung der gesamten Flugstrecke, 2017 rund 230 Mrd. Pkm).

Die im Verkehrsartenvergleich verwendeten Kennzahlen für die Verkehrsmittel des Fernbusverkehrs sind überwiegend im TREMOD-Modell berücksichtigt. Es handelt sich um folgende Werte:

- ▶ **Leergewicht und Kapazität:** In TREMOD-AV werden alle Flugzeugtypen mit ihren Kennzahlen erfasst. Das mittlere Leergewicht und die Kapazität der Flugzeuge wurden daraus verkehrsleistungsgewichtet für den nationalen und internationalen Flugverkehr abgeleitet. Die so ermittelten Kennzahlen wurden mit den von DESTATIS veröffentlichten Verkehrsleistungen und Auslastungsgraden abgeglichen.
- ▶ **Nutzungsdauer und mittlere Jahresfahrleistung:** Für den Flugverkehr wurden die Kennzahlen aus Renewbility III übernommen, da keine aktuellen Werte ermittelt werden konnten.

Tabelle 17: Kennzahlen der Verkehrsmittel im Personenverkehr

Verkehrsmittel / Technologie	Nutzungsdauer [Jahre]	Jahresfahrleistung [km/a]	Kapazität [Plätze]	Leergewicht [t]	Quelle
Langsamverkehr					
Fahrrad	10	1.500	1	0,017	Leergewicht: ecoinvent Nutzungsdauer und Jahresfahrleistung: verschiedene Quellen, geschätzt
Pedelec	10	2.500	1	0,024	Leergewicht: ecoinvent Nutzungsdauer und Jahresfahrleistung: verschiedene Quellen, geschätzt
Pkw					
Benzin-4T	13	10.677	4,5	1,30	Leergewicht und Nutzungsdauer: Auswertung der KBA-Daten für TREMOD; Fahrleistung: TREMOD-Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014

Verkehrsmittel / Technologie	Nutzungsdauer [Jahre]	Jahresfahrleistung [km/a]	Kapazität [Plätze]	Leergewicht [t]	Quelle
Diesel	13	20.287	4,5	1,70	Leergewicht und Nutzungsdauer: Auswertung der KBA-Daten für TREMOD; Fahrleistung: TREMOD-Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014
LPG	13	18.152	4,5	1,52	Leergewicht und Nutzungsdauer: Auswertung der KBA-Daten für TREMOD; Fahrleistung: TREMOD-Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014
bifuel CNG/petrol	13	19.219	4,5	1,49	Leergewicht und Nutzungsdauer: Auswertung der KBA-Daten für TREMOD; Fahrleistung: TREMOD-Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014
PHEV-Benzin	13	14.948	4,5	1,79	Leergewicht und Nutzungsdauer: Auswertung der KBA-Daten für TREMOD; Fahrleistung: TREMOD-Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014
PHEV-Diesel	13	14.948	4,5	2,25	Leergewicht und Nutzungsdauer: Auswertung der KBA-Daten für TREMOD; Fahrleistung: TREMOD-Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014
BEV	13	8.542	4,5	1,52	Leergewicht und Nutzungsdauer: Auswertung der KBA-Daten für TREMOD; Fahrleistung: TREMOD-Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014
Busse					
Fernlinienbus Diesel	4	180.000	56,6	11,15	Leergewicht: Analog zu Reisebus; Fahrleistung: TREMOD-Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014 und DESTATIS 2019
Reisebus Diesel	12	48.082	48,9	11,15	Leergewicht und Nutzungsdauer: Auswertung der KBA-Daten für TREMOD; Fahrleistung: TREMOD-Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014 und DESTATIS 2019
Nahlinienbus Diesel	12	47.028	78,0	12,91	Leergewicht und Nutzungsdauer: Auswertung der KBA-Daten für TREMOD; Fahrleistung: TREMOD-Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014 und DESTATIS 2019
Mot. Zweiräder					
Kleinkraftrad Benzin-2T	12	3.000	1,2	0,10	Leergewicht: ecoinvent; Fahrleistung: TREMOD-Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014, Nutzungsdauer geschätzt.
Motorrad Benzin-4T	12	5.000	2	0,20	Leergewicht: ecoinvent; Nutzungsdauer: Auswertung der KBA-Daten; Fahrleistung: TREMOD-

Verkehrsmittel / Technologie	Nutzungsdauer [Jahre]	Jahresfahrleistung [km/a]	Kapazität [Plätze]	Leergewicht [t]	Quelle
					Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014
Motorrad BEV	12	5.000	2	0,20	Wie Benzin-4T
Eisenbahn					
Nahverkehr elektrisch, Diesel	35	250.000	332	206	Leergewicht und Kapazität: DB Umwelt 2017 für TREMOD und VDV-Statistik, Nutzungsdauer und Jahresfahrleistung: persönliche Mitteilung DB AG, 06.06.2019
Fernverkehr elektrisch, Diesel	40	500.000	520	567	Leergewicht und Kapazität: DB Umwelt 2017 für TREMOD und VDV-Statistik, Nutzungsdauer und Jahresfahrleistung: Renewbility III
Straßen-, Stadt-, U-Bahn					
elektrisch	30	90.776	320	70,7	Kapazität und Jahresfahrleistung: VDV Statistik 2017; Leergewicht: ecoinvent; Nutzungsdauer: Renewbility III
Flugverkehr					
national Kerosin	25	2,24 Mio	122	37,8	Nutzungsdauer und Jahresfahrleistung: Renewbility III; Kapazität und Leergewicht: TREMOD-AV
international Kerosin	25	2,24 Mio	231	116,3	Nutzungsdauer und Jahresfahrleistung: Renewbility III; Kapazität und Leergewicht: TREMOD-AV

3.1.3 Eigenschaften der Verkehrsarten im Güterverkehr

Im Güterverkehr kommen fast ausschließlich motorisierte Verkehrsmittel zum Einsatz. Für den Verteilerverkehr im Nahbereich kommen neben Lieferwagen auch Fahrräder und vermehrt elektrische Lastenräder zum Einsatz. Ansonsten überwiegen im Straßenverkehr Lkw, Last- oder Sattelzüge in verschiedenen Größenklassen. Während der Lkw auf der Straße alle möglichen Einsatzzwecke und Distanzklassen abdeckt, findet Güterverkehr mit Eisenbahn, Binnenschiffen und Flugzeugen fast ausschließlich im Fernverkehr statt.

Fahrradverkehr

Es werden elektrisch betriebene Lastenräder berücksichtigt. Bei der Lebensfahrleistung werden die Kennzahlen der Pedelecs übernommen. Das Leergewicht sowie die Kapazität werden geschätzt, da in ecoinvent keine Angaben zu Lastenrädern enthalten sind. Da es sehr verschiedene Arten und Einsatzzwecke von Lastenrädern gibt, sind diese angenommenen Kennzahlen jedoch nicht repräsentativ.

Lieferwagen

Lieferwagen sind Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis zu 3,5 t (TREMODO-Bezeichnung: leichte Nutzfahrzeuge (LNF)). Leichte Nutzfahrzeuge erfüllen eine Vielzahl von Aufgaben im Wirtschaftsverkehr: Transport von Mitarbeitern und Material für Handwerker und andere Dienstleistungen; als Transporter für Expresslieferungen über lange Distanzen, für private Transporte, als Verteilfahrzeug im Stückgut und Paketdienst u. a. Die Verkehrsleistung wird nicht statistisch erfasst. Leichte Nutzfahrzeuge erbrachten im Jahr 2017 knapp 49 Mrd. Fahrzeugkilometer, das entspricht einem Anteil von 44 % an der Gesamtfahrleistung der Lkw, Last- und Sattelzüge.

Bei den im Verkehrsartenvergleich verwendeten Kennzahlen für die Lieferwagen handelt es sich um folgende Werte:

- ▶ **Leergewicht je Fahrzeug und Antriebstechnologie:** eigene Auswertung des Bestandsdatensatzes, der vom KBA (KBA, n.d.) für die Verwendung in TREMOD zur Verfügung gestellt wird
- ▶ **Nutzungsdauer der Fahrzeuge:** eigene Abschätzung auf Basis der Altersverteilungen im Fahrzeugbestand nach der KBA-Statistik. Eine mögliche Weiternutzung außerhalb Deutschlands wird damit vernachlässigt.
- ▶ **Mittlere Jahresfahrleistung:** Auswertung der Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al., 2016) für TREMOD, umgerechnet auf den Fahrzeugbestand und die Fahrleistungen 2017
- ▶ **Kapazität:** eigene Abschätzung

Lkw, Last- und Sattelzüge

Die Lkw, Last- und Sattelzüge mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 3,5 t tragen die Hauptlast des Straßengüterverkehrs. 2017 betrug deren Verkehrsleistung 491 Mrd. tkm, das entspricht einem Anteil am Güterverkehr innerhalb Deutschlands von 73 % (Radke, 2018).

Im Rahmen des Verkehrsartenvergleichs werden die Lkw im Solobetrieb unterteilt in drei Größenklassen. Die Last- und Sattelzüge werden zu einer Größenklasse zusammengefasst. Die im Verkehrsartenvergleich verwendeten Kennzahlen für die Verkehrsmittel des Straßengüterverkehrs sind überwiegend im TREMOD-Modell berücksichtigt. Es handelt sich um folgende Werte:

- ▶ **Leergewicht je Fahrzeug und Größenklasse:** bei den Lkw eigene Auswertung des Bestandsdatensatzes, der vom KBA für die Verwendung in TREMOD zur Verfügung gestellt wird. Bei den Last- und Sattelzügen wird das Leergewicht wie in Renewbility III (Zimmer et al., 2016) angesetzt.
- ▶ **Nutzungsdauer der Fahrzeuge:** bei den Lkw eigene Abschätzung auf Basis der Altersverteilungen im Fahrzeugbestand nach der KBA-Statistik. Bei den Last- und Sattelzügen wird aufgrund der hohen Laufleistungen eine reduzierte Nutzungsdauer von acht Jahren angenommen.
- ▶ **Mittlere Jahresfahrleistung je Größenklasse:** Auswertung der Fahrleistungserhebung 2014 für TREMOD, umgerechnet auf den Fahrzeugbestand und die Fahrleistungen 2017. Bei den Last- und Sattelzügen wird eine Jahresfahrleistung von 100.000 km angenommen.

- ▶ **Kapazitäten:** Abschätzungen unter Berücksichtigung des vorgegebenen Leergewichts und des zulässigen Gesamtgewichts

Schienengüterverkehr

Im Güterverkehr mit Eisenbahnen wurden im Jahr 2017 129,9 Mrd. tkm erbracht, davon 52 % von der DB AG und 48 % von anderen Bahnunternehmen (Radke, 2018). Insgesamt 96 % der Verkehrsleistung wurde mit Elektrotraktion erbracht. Der Güterverkehr der Eisenbahnen hatte damit einen Anteil von 19 % an der Güterverkehrsleistung in Deutschland.

Die im Verkehrsartenvergleich verwendeten Kennzahlen für die Verkehrsmittel des Straßenverkehrs sind überwiegend im TREMOD-Modell berücksichtigt. Es handelt sich um folgende Werte:

- ▶ **Leergewicht:** DB-Kennzahlen zu Zugkilometern und Bruttotonnenkilometern für TREMOD (DB Umwelt, 2019) .
- ▶ **Nutzungsdauer der Fahrzeuge:** persönliche Auskunft DB AG (DB AG, 2019)
- ▶ **Mittlere Jahresfahrleistung:** Annahmen von Renewbility III
- ▶ **Kapazität:** Kennzahlen der DB AG für TREMOD

Binnenschifffahrt

Im Güterverkehr mit Binnenschiffen wurden im Jahr 2017 55,5 Mrd. tkm erbracht. Der Güterverkehr mit Binnenschiffen hatte damit einen Anteil von 8 % an der Güterverkehrsleistung in Deutschland (Radke, 2018).

Die im Verkehrsartenvergleich verwendeten Kennzahlen für die Binnenschiffe sind teilweise im TREMOD-Modell berücksichtigt. Es handelt sich um folgende Werte:

- ▶ **Leergewicht:** die Annahmen von ecoinvent werden übernommen, aber anhand der Kapazität skaliert
- ▶ **Nutzungsdauer und mittlere Jahresfahrleistung:** Es werden die Kennzahlen von Renewbility III verwendet.
- ▶ **Kapazitäten:** Abschätzungen unter Berücksichtigung des vorgegebenen Leergewichts und des mittleren zulässigen Gesamtgewichts der Schiffsflotte aus TREMOD-NA

Flugverkehr

Beim Flugverkehr werden der nationale und abgehende internationale Flugverkehr einbezogen. In TREMOD-AV wird der Güterflugverkehr typenfein für jede Distanzklasse abgebildet. Dabei wird auch nach Beifracht und reinen Frachtflügen unterschieden.

Beim Güterverkehr liegt der Schwerpunkt im internationalen Verkehr: Im reinen Inlandsverkehr wurden im Jahr 2017 0,051 Mrd. tkm transportiert, im abgehenden internationalen Verkehr waren es 12,4 Mrd. tkm.

Die Kennzahlen für den Güterflugverkehr entstammen den gleichen Quellen wie beim Personenverkehr:

- ▶ **Leergewicht und Kapazität:** In TREMOD-AV werden alle Flugzeugtypen mit ihren Kennzahlen erfasst. Das mittlere Leergewicht und die Kapazität der Flugzeuge wurden

daraus verkehrsleistungsgewichtet für den nationalen und internationalen Flugverkehr abgeleitet. Die so ermittelten Kennzahlen wurden mit den von DESTATIS veröffentlichten Verkehrsleistungen und Auslastungsgraden abgeglichen.

- **Nutzungsdauer und mittlere Jahresfahrleistung:** Für den Flugverkehr wurden die Kennzahlen aus Renewbility III übernommen, da keine aktuellen Werte ermittelt werden konnten.

Tabelle 18: Kennzahlen der Verkehrsmittel im Güterverkehr

Verkehrsmittel / Technologie	Nutzungsdauer [Jahre]	Jahresfahrleistung [km/a]	Kapazität [Tonnen]	Leergewicht [t]	Quelle
Langsamverkehr					
Lastenrad	10	2.500	0,2	0,042	Leergewicht/Kapazität geschätzt; Nutzungsdauer und Jahresfahrleistung wie bei Pedelec
Lieferwagen <=3,5t					
Diesel	13	20.293	0,5	2,00	Leergewicht und Nutzungsdauer: Auswertung der KBA-Daten; Fahrleistung: TREMOD-Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014; Kapazität geschätzt
Lkw Solo					
>3,5-7,5t Diesel	19	39.154	3	4,09	Leergewicht und Nutzungsdauer: Auswertung der KBA-Daten; Fahrleistung: TREMOD-Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014; Kapazität geschätzt auf Basis des Leergewichts und des zulässigen Gesamtgewichts
>7,5-12 t Diesel	19	70.478	5	6,60	Leergewicht und Nutzungsdauer: Auswertung der KBA-Daten; Fahrleistung: TREMOD-Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014; Kapazität geschätzt auf Basis des Leergewichts und des zulässigen Gesamtgewichts
>12 t Diesel	12	80.747	11,25	10,61	Leergewicht und Nutzungsdauer: Auswertung der KBA-Daten; Fahrleistung: TREMOD-Hochrechnung auf Basis der Fahrleistungserhebung 2014; Kapazität geschätzt auf Basis des Leergewichts und des zulässigen Gesamtgewichts
Last-/ Sattelzug					
Diesel	8	100.000	24	15,10	Leergewicht: Renewbility III; Nutzungsdauer und Jahresfahrleistung geschätzt; Kapazität geschätzt auf Basis des Leergewichts und des zulässigen Gesamtgewichts
Eisenbahn					

Verkehrsmittel / Technologie	Nutzungsdauer [Jahre]	Jahresfahrleistung [km/a]	Kapazität [Tonnen]	Leergewicht [t]	Quelle
Güterverkehr elektrisch, Diesel	40	50.000	1070	537	Leergewicht: DB Umwelt 2017 für TREMOD und VDV-Statistik; Nutzungsdauer: persönliche Mitteilung DB AG, 06.06.2019; Jahresfahrleistung: Renewbility III
Binnenschiff					
Diesel	47	30.000	2200	660	Leergewicht: ecoinvent, Anpassung an mittlere Kapazität der Schiffe 2017 aus TREMOD-NA; Nutzungsdauer und Jahresfahrleistung: Renewbility III.
Flugverkehr					
national Kerosin	25	2,24 Mio.	89	37,8	Nutzungsdauer und Jahresfahrleistung: Renewbility III; Kapazität und Leergewicht: TREMOD-AV
international Kerosin	25	2,24 Mio.	86	158,1	Nutzungsdauer und Jahresfahrleistung: Renewbility III; Kapazität und Leergewicht: TREMOD-AV

3.2 Potenzialbetrachtung

Die Potenzialbetrachtung erlaubt eine Gegenüberstellung der Bandbreiten der von den einzelnen Verkehrsmitteln ausgehenden ökologischen Belastungen und somit die Darstellung und den Vergleich der prinzipiellen Vor- und Nachteile der Verkehrsmittel.

Auf Basis der grundsätzlichen Eigenschaften der Verkehrsarten können die prinzipiellen Vor- und Nachteile der Verkehrsmittel hinsichtlich ihrer ökologischen Wirkungen in Abhängigkeit von normierten bzw. vergleichbaren Nutzungsmustern dargestellt werden. Diese Betrachtung wird im ersten Schritt auf das Fahrzeug bzw. auf den Fahrzeugkilometer bezogen diskutiert. Für den Vergleich werden die Umweltwirkungen im zweiten Schritt auf den angebotenen Platzkilometern (Personenverkehr) bzw. auf den angebotenen Kapazitäts-Tonnenkilometern (Güterverkehr) und somit auf die volle Fahrzeugauslastung bezogen. Dies impliziert die Umweltwirkung eines Verkehrsträgers bei einer optimalen Nutzung, die in der Regel in der Realität nicht erreichbar ist.

Ziel dieser Betrachtung ist es, Einzelfahrzeuge, Fahrzeugkollektive oder Verkehrssysteme vergleichbar zu machen und damit besonders günstige Teilsegmente hinsichtlich der Minimierung von Umweltwirkungen in den verschiedenen Wirkungskategorien – insbesondere auch in ihrem Potenzial zur Dekarbonisierung – zu identifizieren. Die Betrachtung liefert darüber hinaus auch Informationen für die mögliche Wirkung von Auslastungsgradänderungen und für das Minderungspotenzial bei Verkehrsverlagerungen.

Die technischen und verkehrlichen Merkmale sowie die Umweltkennzahlen der Verkehrsarten aus der Eigenschaftsbetrachtung sind Grundlage der Betrachtung der typischen Nutzung (Status quo) sowie für die systemischen Bilanzen.

3.3 Betrachtung der typischen Nutzung (Status quo)

Die Betrachtung der typischen Nutzung hat den Fokus auf den Status quo des Verkehrssystems. Als Referenz wird in diesem Verkehrsartenvergleich die Status quo-Betrachtung der Verkehrsarten in Deutschland, jeweils für den Personen- und Güterverkehr abgeleitet. Die Status quo-Betrachtung mit spezifischen Kennzahlen zum Energieverbrauch, den Klimagas- und Schadstoffemissionen wird erweitert um die übrigen Lebenswegabschnitte und Wirkungskategorien sowie die externen Kosten, die in diesem Vorhaben erarbeitet werden.

Ziel ist es somit, eine alle Lebenswegabschnitte und Wirkungskategorien umfassende Darstellung für Deutschland zu erarbeiten und mögliche generelle Schwachpunkte der Datengrundlagen und Methodik zu identifizieren.

Die Ergebnisse der Status quo-Betrachtung liefern Informationen über die ökologischen Wirkungen der einzelnen Verkehrsarten und zeigen auf, welche Verkehrsmittel in welchem Wirkungsbereich besser oder schlechter abschneiden als andere. Sie geben auch Hinweise darauf, welche Verkehrsmittel unter Umweltgesichtspunkten bevorzugt werden sollten. Zur Abschätzung der Wirkung von Verkehrsverlagerungen sind diese Werte manchmal nur bedingt geeignet, insbesondere, wenn sich Auslastungsgrade einzelner Verkehrsmittel, Größe der eingesetzten Fahrzeuge, die Verkehrsleistung (Zu-/Abnahme) und andere Rahmenbedingungen signifikant ändern. Vielmehr sollten solche Fragestellungen systemisch analysiert werden, d. h. unter Berücksichtigung aller mit der Verlagerung einhergehenden Wirkungen. Bei einer Änderung sind systemische Effekte zu berücksichtigen, die mit den durchschnittlichen Kennzahlen nicht abgebildet werden.

3.4 Systemische Betrachtung

3.4.1 Grundlagen der systemischen Betrachtung

Bei der systemischen Betrachtung werden im Gegensatz zur Potenzial- und Status quo-Betrachtung die Auswirkungen von Veränderungen im Verkehrssystem untersucht. Dabei sind sowohl Verlagerungen zwischen den Verkehrsarten als auch vermiedene oder induzierte Verkehre Teil der Betrachtung. Dabei werden die Verkehrsarten nicht isoliert betrachtet, sondern um Wegekettens (also den Vor- und Nachlauf) erweitert und es werden auch Umweltfaktoren berücksichtigt.

Wenn die Auswirkungen einer Verkehrsleistungsänderung mit den Kennzahlen der Status quo-Betrachtung ermittelt werden, wird davon ausgegangen, dass jeder zusätzliche oder reduzierte Personen- oder Tonnenkilometer dieselben Umweltlasten aufweist wie der Durchschnitt. In der Realität kommt es jedoch zu unterschiedlichen Wirkungen durch eine Verkehrsleistungsänderung, die abhängig von der Höhe der Änderung und von der aktuellen Auslastung des Verkehrsmittels sind.

Führt etwa ein Verkehrsleistungsanstieg zu einer Erhöhung der Auslastung des Verkehrsmittels, steigt der Energieverbrauch des Fahrzeugs an. Allerdings würde dieser Anstieg deutlich geringer ausfallen als der in einer Status quo-Betrachtung verwendete spezifische Verbrauchswert suggeriert. Ist hingegen das bestehende Verkehrsmittel bereits voll ausgelastet, kann die Verkehrsleistung nur durch eine Erhöhung des Angebots aufgefangen werden. Dies kann eine Erhöhung der Fahrleistung (und damit ggf. auch der Anzahl der benötigten Fahrzeuge) oder der Fahrzeugkapazität (Sitzplätze oder Nutzlast) darstellen. Zu berücksichtigen ist auch, dass mit einer Angebotsanpassung in der Regel zumindest kurzfristig auch eine Änderung der mittleren Fahrzeugauslastung verbunden ist.

Demnach wird bei der systemischen Betrachtung im Gegensatz zur Betrachtung der typischen Nutzung davon ausgegangen, dass eine Verkehrsleistungsänderung nicht nur die Fahrleistung(en), sondern auch die Auslastung(en) sowie die Fahrzeuggröße(n) beeinflussen kann. Eine Änderung der Verkehrsleistung kann sich damit – je nach Gewichtung der drei Einflussfaktoren – sehr unterschiedlich auf das Ergebnis der ökologischen Bilanzierung auswirken.

Hinzu kommt, dass in jedem der nachgelagerten Lebenswegabschnitte (Energie-, Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung) ggf. weitere Effekte zu berücksichtigen sind. Schließlich ist noch relevant, ob kurz- oder langfristige Änderungen untersucht werden sollen.

3.4.2 Betrachtung von systemischen Änderungen im Hintergrundsystem

Bei der Betrachtung von Änderungen im Verkehrssystem kann es unter Umständen auch zu systemischen Änderungen im Hintergrundsystem (also speziell bei der Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung sowie den Energievorketten) kommen. Oftmals lassen sich diese Änderungen vereinfacht mit den Kennzahlen der typischen Nutzung abbilden, indem hier lediglich die Umlage auf den Fahrzeugkilometer angepasst wird. Bei größeren Änderungen treten jedoch darüber hinaus weitere systemische Effekte auf, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

3.4.2.1 Auswirkungen auf die energetischen Vorketten

Durch Änderungen in den Verkehrsmengen können systemische Effekte auch in der Bereitstellung der für den Fahrbetrieb notwendigen Energieträger auftreten.

Ein Beispiel für Änderungen im Strommix ist der Ausbau der Elektromobilität. Dabei wird in den eLCAR-Guidelines das grundsätzliche Vorgehen wie folgt beschrieben (Del Duce et al., 2013): Sind keine oder geringe Änderungen am System zu erwarten, kann der durchschnittliche Strommix (eventuell unterschieden nach Region und Ladezeitpunkt) verwendet werden. Bei einem starken Hochlauf der Elektromobilität können jedoch systemische Effekte auftreten, da die Stromnachfrage deutlich steigt. Dies hätte wiederum einen Einfluss auf Stromerzeugungsseite, wodurch sich der Strommix signifikant ändern könnte.

Für die Ableitung eines solchen zukünftigen Strommixes muss zunächst geprüft werden, welche Kraftwerke bei einer erhöhten Stromnachfrage zusätzlich betrieben werden. Dabei kann zwischen einem kurzfristigen marginalen Strommix und einer Langzeitperspektive unterschieden werden. Ausschlaggebend für das kurzfristige eingesetzte marginale (also Grenz-) Kraftwerk ist die sogenannten Merit-Order. Diese Merit-Order listet die jeweiligen Kraftwerke nach ihren Grenzkosten auf. In einem nicht weiter regulierten System wird eine zusätzliche Stromnachfrage zunächst von denjenigen Kraftwerken mit den geringsten Grenzkosten, die zusätzlichen Strom liefern können, bereitgestellt. In Deutschland sind die Kraftwerke mit den geringsten Grenzkosten (neben den Erneuerbaren) die Kernkraftwerke sowie die Braun- und Steinkohlekraftwerke. Im schlechtesten Fall (zumindest aus Sicht der Treibhausgasemissionen) führt also eine zusätzliche Stromnachfrage dazu, dass verstärkte Braunkohlekraftwerke Strom einspeisen. Zusätzlich ist der kurzfristige marginale Strom jedoch von weiteren Faktoren abhängig, wie z. B. dem genauen Ort der zusätzlichen Nachfrage sowie der Tages- und Jahreszeit.

In dieser Studie liegt jedoch der Fokus auf der Betrachtung von systemischen Langzeiteffekten. Werden diese Effekte bei einer zusätzlichen Stromnachfrage untersucht, spielen auch die politischen Rahmenbedingungen sowie die möglichen Zubau-Optionen eine entscheidende Rolle. In Deutschland ist der Ausstieg aus der Kernkraft bis 2022 bereits beschlossen und ein weiterer Zubau der Wasserkraft in keinem signifikanten Umfang möglich. Da auch der

schrittweise Kohleausstieg bis 2038 durch die Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ (BMWi, 2019) beschlossen und der Bundesregierung vorgelegt wurde, kann im besten Fall ein Kraftwerkszubau ausschließlich im Bereich der erneuerbaren Energien sowie bei den Gaskraftwerken erfolgen. Daraus lassen sich Szenarien für einen möglichen zukünftigen (Lade)Strommix ableiten, die jedoch stark von den gewählten Randbedingungen sowie auch der Ableitung künftiger Stromgestehungskosten abhängen. Die Quantifizierung solcher zukünftiger Strommixe ist nicht Teil dieser Studie.

Auch bei der Bereitstellung der Kraftstoffe für die Fahrzeuge können unter Umständen systemische Effekte auftreten. Im Gegensatz zur Strombereitstellung gibt es bei den Kraftstoffen jedoch weltweite Kraftstoffmärkte. Dabei führt erst eine deutliche Steigerung der weltweiten Nachfrage nach Erdölprodukten dazu, dass andere Rohölquellen zum Einsatz kommen, die aufwendiger und kostenintensiver zu erschließen sind (z. B. Erdöl aus Teersanden oder Gas aus Fracking) und höhere Umweltwirkungen nach sich ziehen. Da Deutschland derzeit weniger als 5 % Anteil am gesamten Weltmarkt für Rohöl hat, dürfte der Einfluss selbst größerer Änderungen im deutschen Verkehrssystem nur geringe Auswirkungen auf den weltweiten Rohölmarkt haben und wurde daher nicht näher betrachtet. Szenarien für die zukünftige Kraftstoffbereitstellung müssen demnach immer auch die Entwicklungen im Rest der Welt berücksichtigen.

3.4.2.2 Auswirkungen auf die Fahrzeugbereitstellung

Die Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung werden zunächst bezogen auf die Fahrzeug- oder Kapazitätskilometer der Verkehrsmittel bestimmt. Danach erfolgt bei Bedarf eine Zuordnung der Aufwendungen für die Fahrzeuge auf die Personen- bzw. Tonnenkilometer. Für die Systembetrachtung wird davon ausgegangen, dass sich die grundsätzlichen Fahrzeugeigenschaften sowie deren Fahrzeugherstellung nicht ändern. Angepasst werden können jedoch teilweise die Fahrzeuggrößen (z. B. Einsatz längere Züge mit mehr Waggons) sowie die Lebenslaufleistung der Fahrzeuge (was wiederum Rückwirkungen auf die Zurechnung der Herstellungsemissionen hat) sowie die Auslastung (und damit indirekt auch die Zahl) der Fahrzeuge.

Daneben könnten unter bestimmten Umständen auch Änderungen in der Fahrzeugherstellung selber auftreten, die hier jedoch nur kurz qualitativ beschrieben werden.

Ein Beispiel hierfür ist die breite Einführung von Elektro-Fahrzeugen. In den letzten Jahren gab es gerade bei den Elektrofahrzeugen eine sehr dynamische Entwicklung und weltweit steigen die Verkaufszahlen bei Elektrofahrzeugen stark an. Nach den eLCAr-Guidelines (Del Duce et al., 2013) erfordert die Quantifizierung der durch diese Entwicklung auftretenden systemischen Effekte einen großen Aufwand, da sich auch die für die Fahrzeugherstellung benötigten Rohstoffe in ihren Vorketten teilweise verändern können. Deswegen kann hier nur das grobe Vorgehen kurz beschrieben werden.

Es kann davon ausgegangen werden, dass (zumindest in Deutschland) im ähnlichen Maße wie der Markt für Elektrofahrzeuge wächst, auch der Marktanteil der konventionellen Fahrzeuge zurückgeht. Interessant für die systemischen Entwicklungen sind also nur diejenigen Materialien und Produktionsprozesse, die sich zwischen den beiden Antriebsarten unterscheiden. Dies dürften vor allem der Elektromotor und die Batterie sowie die dafür benötigten Materialien wie Kupfer, Neodym, Lithium, Kobalt sowie Nickel sein. Dabei erfolgt die Entwicklung bei den Fahrzeugbatterien in den letzten Jahren sehr dynamisch, es dürften sich daher auch Materialzusammensetzungen, Energiedichten und Herstellungsaufwendungen für Batterien in den nächsten Jahren deutlich verändern. Auch in diesem Fall hat Deutschland

allerdings nur einen geringen Anteil am gesamten Fahrzeugweltmarkt. Wichtig wäre es hier also den gesamten Weltmarkt zu betrachten.

3.4.2.3 Auswirkungen auf die Infrastrukturbereitstellung

Die Infrastruktur stellt einen Sonderfall dar, da Straßen und Schienen sehr langlebig sind und hier keine kurzfristigen Veränderungen möglich sind. Damit kann in den meisten Fällen davon ausgegangen werden, dass keine Infrastruktur zu- oder rückgebaut wird, wenn sich die Verkehrsmengen ändern. Erst wenn größere Veränderungen auf bestimmten, aktuell bereits gut ausgelasteten Relationen berechnet werden sollen, müssen auch Änderungen an der Infrastruktur bedacht werden, diese können jedoch im Verkehrsartenvergleich aktuell aufgrund der Datenlage vermutlich nicht berücksichtigt werden. Abgebildet wird jedoch, sofern relevant, eine Änderung der Umlage der Verkehrsinfrastruktur auf die Fahrzeugkilometer.

3.5 Vorgehen bei systemischen Betrachtungen

Umweltbilanzen, die verkehrliche Änderungen abbilden sollen, müssen alle relevanten aus den Änderungen resultierenden Umweltentlastungen und -belastungen berücksichtigen. Die systemische Betrachtung bilanziert demnach alle ökologischen Wirkungen, die durch eine veränderte Verkehrsartenwahl entstehen. Konkret ist bei einer systemischen Bilanzierung zu berücksichtigen

- ▶ zwischen welchen Verkehrsarten Verlagerungen auftreten und welchen Umfang diese haben,
- ▶ welche Änderungen bei den Wegeketten auftreten (geänderte Routen und damit geänderte Wegelängen, geänderte oder neue multimodale Wegeketten, z. B. die Vor- und Nachläufe für die Anfahrt zur Haltestelle),
- ▶ ob Fahrten bei den betrachteten Verkehrsarten induziert werden oder wegfallen
- ▶ und welche umweltrelevanten Änderungen bei den weiteren Lebenswegabschnitten außerhalb der Nutzung, z. B. bei der Energiebereitstellung und der Infrastruktur, zu berücksichtigen sind.

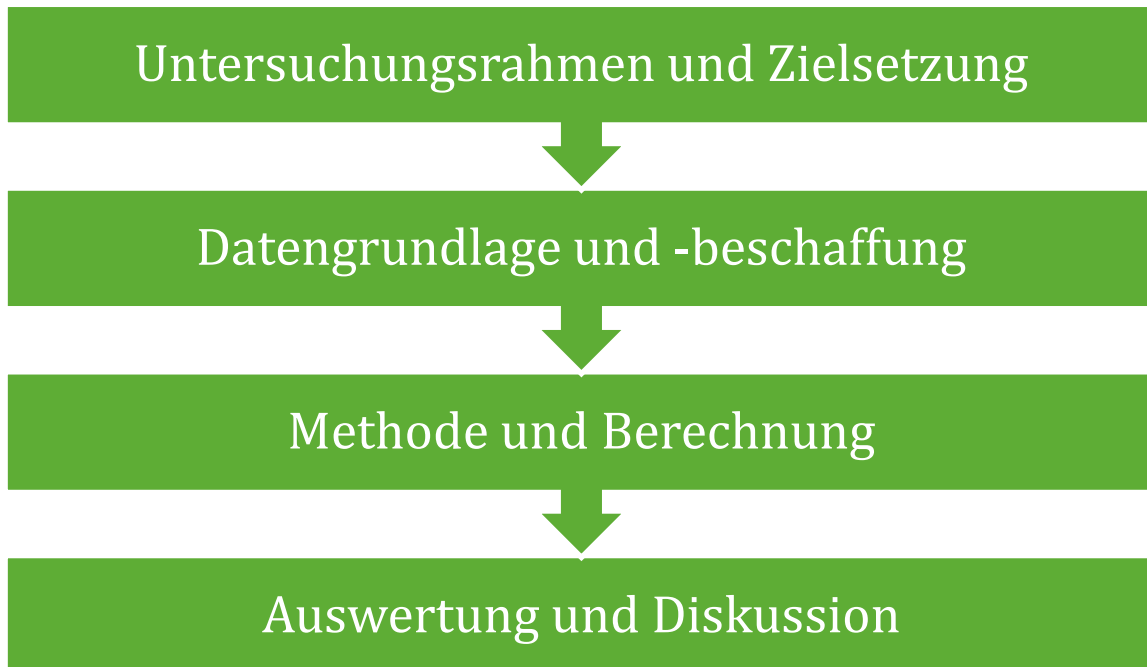
Es gibt eine große Vielfalt an möglichen Fragestellungen, die mit einer systemischen Bilanzierung quantifiziert und bewertet werden können. Wichtig ist daher eine transparente Darstellung der getroffenen Annahmen und des gewählten Vorgehens, sowie der resultierenden Unsicherheiten, um die Ergebnisse richtig einordnen zu können.

In diesem Verkehrsartenvergleich liegt der Schwerpunkt der systemischen Bilanzierung auf der Verlagerung von Verkehrsleistungen auf ökologisch vorteilhaftere Verkehrsmittel innerhalb der in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Verkehrsarten und Distanzklassen. Im Fokus der hier vorgestellten Methodik ist die Ermittlung von Verlagerungspotenzialen in Deutschland. Die Methodik ist jedoch auch auf andere Bilanzgrenzen und Fragestellungen anwendbar. Betrachtet wird hierbei in der Regel der durch die Verlagerung ausgelöste Unterschied zwischen der Ausgangssituation und dem Zustand, der sich nach der Änderung einstellt. Zwar ist der Transformationsprozess auch von Relevanz, jedoch steht bei der Quantifizierung die Differenz des „Endzustands“ und des Ausgangszustands im Fokus.

Die systemischen Bilanzen werden in dieser Studie anhand ausgewählter relevanter Fragestellungen, den sogenannten Betrachtungsfällen, erstellt und diskutiert. Für die systemische Bilanzierung wurde ein Vorgehen erarbeitet. Abbildung 6 gibt einen Überblick über

die einzelnen Schritte. Der dargestellte Ablauf ist jedoch nicht als streng sequenzielles Vorgehen zu verstehen. Vielmehr weist das Vorgehen einen iterativen Charakter auf und ist als Prozess zu verstehen. So kann z. B. die Datenbeschaffung durchaus die Bilanzierung und die gesetzten Rahmenbedingungen beeinflussen.

Abbildung 6: Ablaufschema einer systemischen Bilanzierung



In den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Schritte des Schemas näher erläutert.

3.5.1 Untersuchungsrahmen und Zielsetzung

Der erste Schritt der systemischen Betrachtung ist die möglichst exakte Beschreibung der Aufgabenstellung. Kernfragen, die hierfür beantwortet werden müssen sind unter anderem:

- ▶ Welches Ziel verfolgt die Analyse, für wen sind die Ergebnisse gedacht und wer ist der Auftraggeber? Welche Fragestellung(en) sollen untersucht werden? Worauf bezieht sich die Analyse und welche Bezugsgrößen werden ausgewählt? Wer ist Durchführender?
- ▶ Wie werden die (zeitlichen, geografischen und sonstigen) Bilanzgrenzen gewählt?
- ▶ Welche Transportarten, Distanzklassen und Verkehrsarten sind betroffen?
- ▶ Welche Verkehrsmittel müssen Teil der Analyse sein?
- ▶ Gibt es neben den Einflüssen auf das Verkehrssystem noch weitere Einflüsse auf die Hintergrundprozesse, welche berücksichtigt werden müssen?

Dieser erste Schritt ist von zentraler Bedeutung für die späteren Analysen und daher sollte der Untersuchungsrahmen möglichst genau abgegrenzt werden. Die Beschreibung der Zielsetzung erlaubt eine zielgerichtete Auswertung der erhaltenen Ergebnisse, um die gewünschte

Fragestellung beantworten zu können. Die Nennung des Auftraggebers bzw. des Durchführenden dient der Transparenz und Einordnung der erhaltenen Ergebnisse.

Zentral ist auch die Wahl einer geeigneten Bezugsgröße. Diese kann sich sowohl auf Größen wie die Emissionen pro Personen- oder Tonnenkilometer als auch auf die Emissionen pro Zeiteinheit oder zurückgelegter Strecke beziehen. Auch weitere Bezugsgrößen sind denkbar, wichtig ist die Funktion des Systems möglichst exakt zu beschreiben. Die Wahl einer geeigneten Größe beeinflusst die Ergebnisse und ihre Interpretation maßgeblich. In einigen Fällen ermöglicht ein reiner Bezug auf die zurückgelegten (Personen- oder Tonnen-)Kilometer noch kein vollständiges Bild. Wird z. B. eine Reise mit dem Flugzeug von Frankfurt nach New York über die Verkehrsleistung bilanziert, ergibt sich dieselbe Umweltwirkung für einen Wochenendausflug und eine zweiwöchige Reise. Werden hingegen die Umweltwirkungen für dasselbe Reiseziel auf die Aufenthaltsdauer am Zielort bezogen, dann resultieren hieraus unterschiedliche Umweltwirkungen.

Bilanzgrenzen

Die Bilanzgrenzen bestimmen die geographische und zeitliche Einordnung und lassen sich aus der Fragestellung ableiten. Betrachtet wird hier:

- ▶ Für welche Länder, Regionen, Städte oder Verkehrsrelationen soll die Analyse gemacht werden?
- ▶ Was ist das Bezugsjahr des Ausgangszustandes?
- ▶ Über welchen zeitlichen Horizont wird die Systemänderung betrachtet?
- ▶ Welche Lebenswegabschnitte müssen berücksichtigt werden?

Diese Einordnung der zeitlichen und räumlichen Bilanzgrenzen ist transparent und klar zu definieren und muss im Einklang mit der Fragestellung stehen.

Wichtig bei der Bestimmung der Bilanzgrenzen ist auch die Unterscheidung zwischen dem Vorder- und Hintergrundsystem. Im Vordergrundsystem sind alle Prozesse enthalten, die direkt durch die Fragestellung beeinflusst werden und innerhalb der gewählten Bilanzgrenzen liegen. Speziell die vor- und nachgelagerten Prozesse wie z. B. die Fahrzeugherstellung erfolgen jedoch oftmals außerhalb der gewählten Bilanzgrenze. Diese sind daher im sogenannten Hintergrundsystem erfasst. Sowohl die direkt betroffenen Prozesse als auch die Hintergrundprozesse müssen ausreichend beschrieben werden, um die gesamten Umweltwirkungen eines Systems abzubilden. Oftmals reicht es jedoch bei der Datenerhebung den Fokus auf das Vordergrundsystem zu legen. Für das Hintergrundsystem können dann Daten aus der Status quo-Analyse oder aus anderen Sekundärquellen wie z. B. Ökobilanzdatenbanken oder anderen Studien zugrunde gelegt werden.

Neben der Definition der geographischen Grenzen ist der Bezugszeitraum des Ausgangszustands relevant. Sämtliche verkehrlichen und umweltrelevanten Größen sind jeweils auf die gewählten Bilanzgrenzen zu beziehen. Oftmals werden Daten als Mittelwert eines Jahres innerhalb bestimmter geographischer Grenzen angegeben, aber es sind auch andere Abgrenzungen denkbar. In vielen Fällen bietet es sich an, das Bezugsjahr als Momentaufnahme zu betrachten und die Verlagerungspotenziale für dieses Jahr zu ermitteln.

Gerade bei größeren Änderungen ist eine solche Momentaufnahme jedoch oft nicht sinnvoll, da die Effekte sich erst nach einer gewissen Zeitspanne einstellen. Hier ist es dann erforderlich auch zeitliche Entwicklungen zu berücksichtigen, die unabhängig vom betrachteten Fall eintreten. So können sich z. B. Verkehrsleistungen und Emissionsfaktoren über einen Zeitraum ändern, sodass ein Verlagerungspotenzial, welches für ein Jahr für einen geographischen Ort ermittelt wurde, in einem zukünftigen Jahr anders zu bewerten und zu quantifizieren ist.

Darüber hinaus ist anzugeben, welche Lebenswegabschnitte in die Betrachtung miteinbezogen werden. Es ist klar zu definieren, ob die ermittelten Umweltwirkungen die Vorketten, die Nutzungsphase, den Materialaufwand und den Aufwand für die Infrastrukturbereitstellung abdecken. Hierbei müssen alle Verkehrsarten dieselben Abgrenzungen aufweisen und alle für die Analyse relevanten Lebenswegabschnitte enthalten. Damit sollen Verschiebungen in den Umweltwirkungen auf Prozesse, die außerhalb der gewählten Bilanzgrenze liegen, verhindert werden. So ist z. B. ein Vergleich der direkten Betriebsemissionen eines Dieselfahrzeugs mit einem Elektrofahrzeug nicht zulässig. Hier müssen auch die Strom- sowie die Dieselpreispunkte berücksichtigt werden sowie die unterschiedlichen Aufwände in der Fahrzeugherstellung. Aufwendungen für die Straßeninfrastruktur könnten hingegen in diesem Falle vernachlässigt werden, da es hier keine Unterschiede zwischen den beiden Konzepten gibt.

Einordnung der Transportart, Distanzklasse und Verkehrsart

Neben den Bilanzgrenzen ist eine Einordnung der Transportart und der Distanzklasse vorzunehmen. Zu klären ist:

- ▶ Handelt es sich um Personen- oder Güterverkehr? Gibt es ggf. relevante Auswirkungen auf beide Bereiche, z. B. bei Änderungen der Infrastruktur?
- ▶ Um welche Distanzklasse(n) handelt es sich?
- ▶ Welche Verkehrsarten sind betroffen?

Die Transportart ist in der Regel bereits durch die Fragestellung definiert. Es kann jedoch auch vorkommen, dass z. B. eine Änderung im Personenverkehr einen Einfluss auf den Güterverkehr hat. Zudem kann z. B. bei Passagierflugzeugen der Auslastungsgrad erhöht werden indem die Beifracht erhöht wird. Eine Allokation der Emissionen würde in diesem Fall auch die spezifischen Passagieremissionen beeinflussen.

Aufgrund der Fragestellung kann in der Regel eine Eingrenzung der Distanzklassen vorgenommen werden. Sollen z. B. Verlagerungen von Berufspendelverkehren analysiert werden, beschränkt sich der überwiegende Teil der betrachteten Verkehrsleistung auf den Nah- und Regionalverkehr. Durch diese Eingrenzung können die relevanten Verkehrsarten herausgefiltert werden und mögliche spezifische Kenngrößen für diese Distanzklasse herangezogen werden. So weist z. B. der MIV im Nahverkehr einen anderen Besetzungsgrad auf als im Fernverkehr. Demgegenüber kann der Flugverkehr im Nah- und Regionalverkehr gänzlich außer Acht gelassen werden.

Betroffene Verkehrsmittel und Verkehrsleistungsänderungen

Durch die Eingrenzungen der Distanzklasse, Transportart und Verkehrsart können die relevanten Verkehrsmittel und verkehrlichen Änderungen identifiziert werden. Zu beschreiben ist qualitativ:

- ▶ Welche Verkehrsmittel sind im definierten Bilanzraum relevant bzw. sind von den Änderungen betroffen? Wie setzen sich Wegekette zusammen?

- ▶ Welche Änderungen bei den betrachteten Verkehrsmitteln treten auf? Kommt es zu Verlagerungen auf andere Verkehrsmittel? Entfällt Verkehr bzw. wird Verkehr induziert?

Die Eingrenzung der Verkehrsmittel ist notwendig, um die Problemstellung zu präzisieren. Für die Frage welche Verkehrsmittel relevant sind, ist eine Differenzierung der Wegekette in Hauptlauf und Vor-/Nachlauf nötig. Sollen etwa Verlagerungen im Personenfernverkehr ermittelt werden, so müssen für den Hauptlauf alle Verkehrsmittel berücksichtigt werden, die in einem relevanten Maßstab für diesen Zweck eingesetzt werden. Neben diesem Hauptlauf sind jedoch auch Verkehrsmittel des Vor-/Nachlaufs zu berücksichtigen (z. B. Verkehrsmittel die dafür eingesetzt werden um Personen, die eine Bahnfahrt antreten, zum Bahnhof bzw. vom Bahnhof zum Ziel zu befördern).

Zudem ist es sinnvoll in primäre und sekundäre Änderungen zu unterscheiden. Neben den (oftmals erwünschten) direkten Verlagerungen zwischen gleichwertigen Verkehrsmitteln kann es durch eine attraktivere Gestaltung eines bestimmten Verkehrsmittels (z. B. durch Angebotsausweitung oder Preissenkungen) zusätzlich zu induzierten Verkehren kommen. Ebenfalls möglich ist der ersatzlose Wegfall von Verkehr, wenn die Bedingungen in einem bestimmten Verkehrsmittel deutlich verschlechtert werden. Hierbei ist auch ein möglicher Umwegfaktor zu berücksichtigen, da dieselbe Transportaufgabe je nach Verkehrsmittel mit unterschiedlichen zurückgelegten Distanzen verbunden sein kann.

Zusätzlich können jedoch auch weitere sekundäre Effekte auftreten, die oftmals kaum zu quantifizieren sind. Sinkt z. B. durch den Wegfall von Pkw-Verkehr die Auslastung einer Straße, kann dies unter Umständen dazu führen, dass neuer Verkehr in anderen Bereich wie dem Güterverkehr dazukommt. Diese können unter Umständen die Einsparungen (über)kompensieren, die an anderer Stelle erreicht wurden.

Ein gutes Beispiel dafür ist die Entwicklung im deutschen Fernverkehr nach der Einführung des Fernlinienbusses. Als Reaktion auf die günstigen Fahrpreise bei den Bussen und dem Marktanteilverlust an diese hat die Deutsche Bahn AG ihre Preispolitik angepasst und durch diese und weitere Maßnahmen die Attraktivität der Schiene gestärkt (Gipp, 2015). Seither steigen die Zahlen im Fernverkehr der Bahn wieder, ohne dass beim Fernlinienbus die Fahrten zurückgehen.

Einflüsse auf das Hintergrundsystem

Neben den Effekten, welche direkt die betrachteten Verkehrsmittel betreffen kann es darüber hinaus auch Anpassungen im Hintergrundsystem geben. Dies betrifft insbesondere die Infrastruktur, den Strommix oder die Kraftstoffbereitstellung. Mögliche Fragestellungen sind hier:

- ▶ Welchen Einfluss hat der geänderte Energiebedarf auf die Energiebereitstellung?
- ▶ Bewirkt ein entstehender Engpass einen Ausbau der Infrastruktur?

In vielen Fällen sind Quantifizierungen, insbesondere in Bezug auf infrastrukturelle Engpässe, schwer zu bewerkstelligen. Daher werden die Einflüsse auf das Hintergrundsystem bei den Betrachtungen oft ausgeklammert. In einigen Fällen jedoch können diese weitreichenden Auswirkungen haben, die nicht vernachlässigbar sind. Ein Beispiel hierfür wäre die flächendeckende Einführung der Elektromobilität im Pkw-Bereich, die wiederum einen großen Einfluss auf das Stromnetz und die Strombereitstellung hat.

Wichtigste Inhalte für „Untersuchungsrahmen und Zielsetzung“

- ▶ Beschreibung der Aufgabenstellung, Zielsetzung und Zielgruppe sowie des Auftraggebers
- ▶ Beschreibung der (zeitlichen/geografischen/sonstigen) Bilanzgrenzen und der Bezugsgröße
- ▶ Bestimmung der betroffenen Transport- und Verkehrsarten sowie ihrer Distanzklassen
- ▶ Bestimmung der betroffenen Verkehrsmittel
- ▶ Qualitative Einordnung der Veränderungen

3.5.2 Datengrundlage und -beschaffung

Im Anschluss an die Beschreibung von Untersuchungsrahmen und Zielsetzung muss die Datenbeschaffung durchgeführt werden. Hierbei stellen sich folgende Fragen:

- ▶ Welche Daten werden benötigt und welche Anforderungen an diese bestehen (z. B. bezüglich der Datenqualität)?
- ▶ Welcher Detaillierungsgrad wird benötigt und welche Maßeinheiten sind geeignet?
- ▶ Können Daten aus Befragungen, Statistiken oder sonstigen Datenquellen genutzt werden?
- ▶ Welche Emissionsfaktoren sollen verwendet werden?

Bei der Datenbeschaffung sind bevorzugt solche Daten zu verwenden, die für die gewählten Bilanzgrenzen gelten. Oftmals gibt es jedoch keine Primärdaten für die gewählten Bilanzgrenzen. In diesem Fall muss mit anderen geeigneten (Literatur-)Daten gearbeitet werden. Hierbei ist es wichtig auf eine gute Datenqualität und eine ausreichende Übertragbarkeit zu achten.

Grundsätzlich sind immer möglichst aktuelle und gut zur zeitlichen, räumlichen und sonstigen Abgrenzung passende Daten zu verwenden, die aus verlässlichen und nachvollziehbaren Quellen stammen.

Bei der Datenbeschaffung ist auf eine gute **zeitliche Übereinstimmung** zu achten. Im Idealfall sind möglichst in allen Bereichen die Daten mit dem gewählten Bezugsjahr deckungsgleich. Je nach Zeithorizont der Analyse können sich einige Kennzahlen im Zeitverlauf ändern, wie z. B. die Zusammensetzung einer Fahrzeugflotte oder die spezifischen Verbräuche der Fahrzeuge nach Baujahr.

Wichtig ist auch eine möglichst hohe **geografische Übereinstimmung**. Liegen die Daten nicht für die betrachteten räumlichen Grenzen vor, gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Falls Daten innerhalb der Bilanzgrenzen in einem kleineren Maßstab, also einer Teilmenge der gewählten Grenzen, vorliegen, können „Bottom-Up“-Analysen durchgeführt werden. Durch geeignete Methoden, z. B. anhand einer Skalierungsgröße, können die Werte auf das definierte System hochgerechnet werden. Wenn das definierte System eine Teilmenge des Systems ist, für das die Daten vorliegen, kann ein „Top-Down“-Ansatz gewählt werden. Hier können die Daten auf das definierte System herunterskaliert werden.

Liegen innerhalb der eigenen geografischen Bilanzgrenze keine ausreichenden Daten vor, können auch Daten anderer Orte gewählt werden. Sind Entwicklungen nicht für den

betrachteten Ort (z. B. Deutschland) gegeben, könnten auch verfügbare Daten eines anderen Ortes (z. B. Frankreich) gewählt werden. Ein besonderes Augenmerk ist in diesem Fall auf die Vergleichbarkeit zu legen. Ein Entwicklungsland ist beispielsweise nicht mit einer Industrienation vergleichbar. Auch bei einer Vergleichbarkeit der Orte sind die Daten eines anderen Ortes mit Bedacht zu verwenden, da sich oft die Verkehrssysteme und Bedingungen zwischen den verschiedenen Orten stark unterscheiden und es damit zu Unsicherheiten kommen kann.

Für die Bearbeitung der Fragestellung sind sowohl Daten zur Beschreibung des Ausgangszustandes als auch zu den verkehrlichen Änderungen nötig. Neben den Einflüssen auf das Vordergrundsystem werden auch Angaben zu möglichen Änderungen im Hintergrundsystem benötigt (z. B. bei der Infrastruktur).

Im Folgenden erfolgt zunächst eine Erläuterung der benötigten Daten für die verkehrlichen und fahrzeugseitigen Entwicklungen.

Mobilitätskenngrößen

Um Umweltwirkungen bestimmen zu können ist in der Regel zunächst der Ausgangszustand zu klären. Für den Ausgangszustand sind die Verkehrsleistungen aller betrachteten Verkehrsmittel zu ermitteln (getrennt in Haupt- und Nebenlauf). Dabei wird eine Differenzierung der Verkehrsleistung zwischen Aufkommen und Wegedistanz empfohlen.

Das Aufkommen wird insbesondere für die Analyse von Wegeketten benötigt, da die Verkehrsleistung des Vor-/Nachlaufs primär vom Aufkommen abhängt und nur begrenzt von der zurückgelegten Distanz im Hauptlauf. Wenn eine Differenzierung aufgrund der Datenverfügbarkeit nicht möglich sein sollte, erschwert dies die Berücksichtigung des Vor-/Nachlaufs. Um diesen beschreiben zu können, sind darüber hinaus sowohl die Zusammensetzung der Wegekette als auch die Distanzen der jeweiligen Verkehrsmittel des Vor-/Nachlaufs notwendig. So ist z. B. zu klären, wie viel Prozent der Bahnfahrgäste mit dem Pkw zum Bahnhof gelangen und welche Distanz sie hierbei zurücklegen.

Ausgangspunkt einer systemischen Bilanzierung ist oftmals eine Änderung der Verkehrsnachfrage oder der Verkehrsmittelwahl. Demnach ist in einem ersten Schritt zu klären, wie sich Aufkommen und Verkehrsleistung bei den betrachteten Verkehrsmitteln gegenüber dem Ausgangszustand ändern. Für den Hauptlauf ist zu bestimmen, welchen Umfang Verlagerungen und Änderungen der gesamten Verkehrsleistungen haben. Die Gesamtverkehrsleistung im System kann sich zum einen durch vermiedenen oder induzierten Verkehr ändern und zum anderen können auch zeitliche Bedarfsänderungen auftreten, die zu berücksichtigen sind. Diese Bedarfsänderungen entstehen über einen längeren Zeitraum. Wenn demgegenüber lediglich das Potenzial nur für einen statischen Zeitpunkt (z. B. das Jahr 2015) ohne Berücksichtigung der Bedarfsänderungen der Folgejahre analysiert werden soll, wird die gesamte Verkehrsmenge lediglich durch den aktuell vermiedenen oder induzierten Verkehr beeinflusst.

Für die Bestimmung der Verlagerung sind in der Regel Größen, wie z. B. die Preiselastizität oder die Transportzeit, notwendig. Um eine möglichst hohe Transparenz bei der Abschätzung der Verlagerungen zu erreichen, sind die Randbedingungen anzugeben.

Fahrzeugkenngrößen

Neben den verkehrlichen Daten sind zudem die fahrzeugseitigen Größen sowohl des Ausgangszustands als auch des sich einstellenden Endzustands zu erfassen. Diese umfassen die Fahrleistung, die Auslastung und die Fahrzeugkapazität; letztere sind ggf. als Eigenschaft des gewählten Verkehrsmittels bekannt. Sollten keine Daten hierzu vorhanden sein, erschwert dies

eine sinnvolle Analyse der Fahrzeugkenngrößen. Im Optimalfall sind durch die Datenquellen der verkehrlichen Größen auch die Auswirkungen auf die Größen der Verkehrsmittel (z. B. Fahrleistung) gegeben. Hierfür sind allerdings genaue Informationen über die zeitliche und räumliche Nachfrage, aber auch über das Angebot notwendig. Hilfreich ist es dabei, zur besseren Einschätzung von Kapazitätsgrenzen, zwischen Haupt- und Nebenverkehrszeit zu differenzieren, sofern die nötigen Daten gegeben sind. Zudem sollten auch Kenntnisse über die verfügbaren Fahrzeugflotten und Betriebsabläufe vorhanden sein.

Sollte dies jedoch nicht der Fall sein, können auch historische Entwicklungen oder äquivalente Fälle eines anderen Bilanzraumes verwendet werden. Für beide Fälle gilt allerdings, dass die Gegebenheiten ähnlich gelagert sein sollten. Wenn etwa bei der Bahn in der Vergangenheit bei einer Ausgangsauslastung von 30 % und einem Anstieg der Verkehrsleistung um 10 % einen Anstieg der Fahrleistung um 5 % beobachtet wurde, so kann als Näherung diese Entwicklung auch für eine aktuelle Analyse verwendet werden. Dies kann aber nur angenommen werden, sofern die Auslastung, die verkehrliche Änderung und sonstige Randbedingungen in derselben Größenordnung liegen. Sollte die Ausgangsauslastung beispielsweise bereits bei 45 % liegen, könnten Kapazitätsgrenzen eher erreicht sein als bei 30 %.

Schließlich ist zu klären, welche Kennzahlen zur Quantifizierung der Umweltwirkungen betrachteten Verkehrsmittel benötigt werden. Sofern es Änderungen bezüglich der Auslastung oder der Fahrzeugkapazität gibt, sind die fahrleistungsspezifischen Umweltwirkungen zu verwenden. Sollten die Auswirkungen von Zusatzgewicht durch höhere Auslastung bzw. höherer Fahrwiderstand durch eine vergrößerte Kapazität bekannt sein, können diese ebenfalls berücksichtigt werden. Sofern keine Änderungen der fahrzeugseitigen Größen vorliegen bzw. ermittelbar sind, können die verkehrsleistungsspezifischen Umweltwirkungen verwendet werden. Des Weiteren müssen die Umweltwirkungen zu den definierten Bilanzgrenzen passen. So können z. B. bei einer Betrachtung des innerstädtischen Pkw-Verkehrs lediglich die Emissionsfaktoren für diesen Fall (Innerortsbetrieb) herangezogen werden. Hintergrund ist, dass die Emissionsfaktoren (z. B. NO_x) eines Fahrzeugs sich in der Stadt deutlich von der durchschnittlichen Nutzung (also inkl. Autobahnen und Überlandstraßen) unterscheiden können.

Wichtigste Inhalte in der „Datengrundlage und -beschaffung“

- ▶ Bestimmung der benötigten Daten
- ▶ Anforderungen an die Datenqualität
- ▶ Evaluierung des benötigten Detaillierungsgrads
- ▶ Qualitative Beschreibung des Ausgangszustandes
- ▶ Qualitative Beschreibung der verkehrs- und fahrzeugseitigen relevanten Änderungen

3.5.3 Methode und Berechnung

Anschließend an die Datenbeschaffung erfolgen die Quantifizierung der verkehrlichen Größen und die Berechnung der resultierenden Umweltwirkungen. Dabei wird folgendes Vorgehen empfohlen:

- ▶ Quantifizierung der Mobilitätskenngrößen
- ▶ Quantifizierung der Fahrzeugkenngrößen

► Quantifizierung der Umweltwirkungen

Zunächst wird berechnet, wie sich die Verkehrsleitungen der einzelnen Verkehrsmittel gegenüber dem Ausgangszustand verändern. Dabei können verschiedene Effekte eintreten. Zunächst kann sich bei den Verkehrsmitteln die jeweilige Auslastung ändern. Lässt sich die Ausweitung der Verkehrsleitung nicht über eine Erhöhung der Auslastung auffangen, muss die Kapazität erhöht werden – was wiederum Rückwirkungen auf die Auslastung der Verkehrsmittel hat.

Wichtig für die Quantifizierung der Umweltwirkungen sind die jeweiligen Fahrleistungen der Verkehrsmittel und ihre fahrzeugspezifischen Emissionsfaktoren, die sich ebenfalls vom Ausgangszustand unterscheiden können. So hat z. B. ein vollbeladener Pkw einen höheren Kraftstoffverbrauch als ein Pkw mit nur einer Person oder es können sich die Fahrsituationen ändern.

3.5.3.1 Mobilitätskenngrößen

Die Betrachtung setzt in der Regel voraus, dass der Ausgangszustand der untersuchten Verkehrsaktivität(en) vor der Veränderung beschrieben wird. Die Kenngrößen sind hierbei innerhalb der definierten Bilanzgrenzen und für alle Verkehrsmittel der Hauptläufe sowie Vor-/Nachläufe zu quantifizieren. Der Ausgangszustand der betrachteten Verkehrsaktivität wird durch die im Folgenden beschriebenen Mobilitätskenngrößen der Verkehrsmittel festgelegt.

Die Verkehrsleistung (in Personen- oder Tonnenkilometern), setzt sich zusammen aus:

- Anzahl Personenfahrten oder Tonnen (Aufkommen) und
- durchschnittliche Reisedistanz

Die Differenzierung der Verkehrsleistung (*VL*) in Verkehrsaufkommen und durchschnittliche Transportdistanz erfolgt nach folgender Gleichung:

$$VL = \text{Aufkommen} \cdot \varnothing \text{Transportdistanz}$$

Dies ist sinnvoll, da in Systembetrachtungen die Distanz oft eine variable Größe ist. Zudem ist die Differenzierung notwendig, um systemische Effekte der gesamten Wegekette berücksichtigen zu können.

Sofern die Verkehrsleistungen des Ausgangszustands und die Änderungen durch Verlagerungen und induzierten bzw. vermiedenen Verkehr für sämtliche Verkehrsmittel (*X*) definiert sind, können die Verkehrsleistungen nach der Systemänderung (Endzustand) mittels folgender Gleichung ermittelt werden:

$$VL_X^{\text{Endzustand}} = VL_X^{\text{Ausgangszustand}} + \Delta VL_X^{\text{Verlagerung}} + \Delta VL_X^{\text{induziert/vermieden}}$$

Aus der Differenz des Endzustands und Ausgangszustands ergibt sich die Gesamtänderung der Verkehrsleistung eines Verkehrsmittels:

$$\Delta VL_X = VL_X^{\text{Endzustand}} - VL_X^{\text{Ausgangszustand}}$$

Bei der Verlagerung ist zu berücksichtigen, dass sich meist der Nutzen (Transport von Start zu Ziel) nicht ändert, jedoch die Verkehrsleistung unterschiedlich ausfallen kann. Dies kann zum einen den Hintergrund haben, dass die jeweiligen Infrastrukturnetze eine unterschiedliche Dichte aufweisen (Straßennetz dichter als Schienennetz). Zum anderen kann auch das Angebot

dahingehend gestaltet sein, dass Zwischenziele angesteuert werden (z. B. Flug von Frankfurt nach New York über Amsterdam). Dies bewirkt einen zurückgelegten Weg, der länger ist als der direkte Weg zwischen Start und Ziel (Luftlinie). Dieser Umwegfaktor (UF) hängt stark von der betrachteten Relation, dem Verkehrsmittel und der zurückgelegten Distanz ab. Über folgende Gleichung kann die verlagerte Verkehrsleistung von Verkehrsmittel Y auf Verkehrsmittel X bestimmt werden:

$$\Delta VL_X^{Verlagerung} = \frac{UF_X}{UF_Y} \Delta VL_Y^{Verlagerung}$$

Für die Verkehrsleistungsänderung eines Verkehrsmittels des Vor-/Nachlaufs sind neben der Aufkommensänderung im Hauptlauf zudem auch die unterschiedlichen Anteile (a) des jeweiligen Verkehrsmittels am Vor-/Nachlauf, sowie die hierbei zurückgelegten Transportdistanzen, mittels folgender Gleichung anzugeben:

$$\Delta VL = \Delta \text{Aufkommen} \cdot \Delta a \cdot \Delta \text{Transportdistanz}$$

Erhöht sich z. B. das Aufkommen bei der Bahn um 100 Fahrgäste, wobei 25 % den Pkw zum Bahnhof nehmen bei einer Durchschnittsstrecke von 5 km, so ergibt sich eine Erhöhung der Verkehrsleistung beim Pkw in dieser Wegekette um 125 Pkm. Zu beachten ist, dass sowohl die Anteile der Verkehrsmittel an den Wegeketten als auch die Transportdistanz im Vor-/Nachlauf sich ändern können. Eine Konstanz beider Größen kann jedoch in vielen Fällen angenommen werden.

3.5.3.2 Fahrzeugkenngrößen

Unter Fahrzeugkenngrößen werden die folgenden Größen verstanden:

- ▶ Fahrzeugkapazität (Plätze pro Fahrzeug oder max. Nutzlast pro Fahrzeug)
- ▶ Auslastung der Fahrzeuge
- ▶ Fahrleistung

Die Änderungen der fahrzeugseitigen Größen, also von Auslastung (A) und Kapazität (K), können über folgende Gleichung ermittelt werden:

$$VL + \Delta VL = (A + \Delta A) \cdot (K + \Delta K) \cdot (FL + \Delta FL)$$

Der Einfluss einer Verkehrsleistungsänderung auf die fahrzeugseitigen Größen unterscheidet sich je nach Fall und Verkehrsmittel deutlich. Während z. B. bei einem zusätzlichen Mobilitätsbedarf bei einem Pkw oft die Fahrleistung steigt, erhöht sich bei der Bahn in der Regel zunächst die Auslastung, ehe der hinzugekommene Bedarf durch eine Ausweitung der Betriebsleistung kompensiert wird. In dem Sinne ist in den ersten Schritten der Betrachtung zu analysieren, welche der Größen sich bevorzugt ändern und wie hoch diese Änderungen sein werden. Des Weiteren kann bei Bedarf eine zeitliche Differenzierung zwischen kurzfristigen und langfristigen Änderungen vorgenommen werden.

Im Folgenden werden die fahrzeugseitigen Größen erläutert. Zwar sind die drei Größen hier getrennt voneinander dargestellt, allerdings gilt, dass eine Erhöhung der Kapazität und Fahrleistung einen Einfluss auf die Auslastung hat.

Auslastungsänderung

Eine Erhöhung der Auslastung ist vorteilhaft gegenüber einer Kapazitäts- oder Fahrleistungsanpassung, da dabei vorhandene Fahrzeuge effizienter eingesetzt werden. Zwar

steigt hierdurch der Verbrauch des Fahrzeugs durch das zusätzliche Gewicht, aber diese Erhöhung ist zumeist vernachlässigbar.

Zunächst ist anzumerken, dass die Auslastung bei öffentlichen Verkehrssystemen im Tagesverlauf, an bestimmten Tagen oder auf einzelnen Streckenabschnitten stark fluktuierend sein kann. Dies bedeutet, dass eine Verkehrsleistungserhöhung in Situationen mit hoher Nachfrage nicht mehr mit einer Erhöhung der Auslastung aufgefangen werden kann. Vielmehr ist dann eine Anpassung der Betriebsleistung (Kapazität und/oder Fahrleistung) zu den Lastspitzen notwendig. Umgekehrt lässt sich das Angebot in den übrigen Zeiten nicht so stark reduzieren, dass es in etwa der Nachfrage entspricht. Die bei öffentlichen Verkehrsmitteln im Durchschnitt maximal erreichbare Auslastung liegt somit deutlich unter dem theoretischen Optimum von 100 %.

Verallgemeinert gilt: Je höher die durchschnittliche Auslastung in einer konkreten Situation ist, desto weniger kann eine zusätzliche Verkehrsleistung durch Auslastungssteigerungen ausgeglichen werden.

Neben der zeitlichen Fluktuation der Nachfrage und damit der Auslastung sind weitere Grenzen zu nennen, die dazu führen, dass trotz vorhandener Kapazitäten die Auslastung nicht in dem möglichen Maße steigt. Zum einen stehen beim MIV die individuellen Bedürfnisse (z. B. Komfort) im Vordergrund. Hier wird eine nennenswerte Steigerung oft nicht erreicht, obwohl es auch hier Potenziale (z. B. Ride-Sharing) gibt. Zum anderen gibt es auch im Güterverkehr Grenzen die zu beachten sind. Zu nennen wären hier logistische Faktoren, wie Leerfahrten, die zum Teil nur schwer zu vermeiden sind, aber auch Transporte, die volumetrischen Begrenzungen unterliegen, sodass die massenbezogene Kapazität des Fahrzeugs nicht erreicht werden kann.

Kapazitätsänderung

Der Einsatz größerer Fahrzeuge ermöglicht eine Erhöhung der Kapazität, wodurch bei gleichen Fahrleistungen mehr Personenfahrten bzw. Gütertransporte erreicht werden können. Im Gegensatz zu Auslastungsänderungen lassen sich Kapazitätsänderungen in der Regel nicht sofort realisieren, wenn die Verkehrsleistung steigt, sondern nur mit zeitlicher Verzögerung. Dies hat den Hintergrund, dass für eine Umstellung ein Fahrzeug mit geänderter Kapazität benötigt wird. Da im ÖV, bei Privatpersonen und in der Logistik jedoch in der Regel ein begrenzter Fuhrpark vorhanden ist, kann eine Umstellung oft nicht unmittelbar bei Bedarf erfolgen.

Weitere Hemmnisse sind Grenzwerte für Fahrzeuggrößen, wie zum Beispiel der Tiefgang (Schifffahrt), das maximale Abfluggewicht (Luftfahrt), die maximale Länge eines Zuges oder das maximale Abmaß und das maximal zulässige Gesamtgewicht von Straßenfahrzeugen.

Der Einsatz größerer Fahrzeuge kann bei zunehmendem Verkehrsaufkommen von Vorteil sein. Es können meistens Kosteneinsparungen gegenüber dem Einsatz mehrerer Fahrzeuge erzielt werden, die für die Bereitstellung derselben Betriebsleistung nötig wären. Des Weiteren können durch eine Reduktion des Verkehrsaufkommens der Verkehrsfluss und somit Verspätungen minimiert werden. Aber auch Engpässe wie zum Beispiel verfügbares Personal oder Slots (Luftfahrt), können durch größere Fahrzeuge umgangen werden. Die Umweltwirkungen (insb. der Energiebedarf) sind im Vergleich zu einer Auslastungssteigerung höher. Der Grund hierfür ist neben der Gewichtserhöhung eine Vergrößerung der Stirnfläche des Fahrzeugs und somit des Strömungswiderstands. Da im Bereich des MIV nur selten die Auslastungsgrenze erreicht wird, kann hier in der Regel von einer konstanten Kapazität ausgegangen werden.

Zu beachten ist, dass eine Erhöhung der Kapazität bei gegebener Verkehrsleistung eine Verringerung der Auslastung bewirkt.

Die relative Änderung der Auslastung (A) bei alleiniger Anpassung der Kapazität (K) ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$\frac{\Delta A}{A} = -\frac{1}{1 + \frac{\Delta K}{K}}$$

Änderungen der Fahrleistung

In vielen Fällen ist es unausweichlich, dass ein erhöhter Bedarf an Mobilität durch zusätzliche Fahrten ausgeglichen wird.

Eine Erhöhung der Fahrleistung kann manchmal durch eine intensivere Nutzung der Fahrzeuge erfolgen. Dies hat den positiven Effekt, dass gleich viele Fahrzeuge für eine erhöhte Verkehrsleistung benötigt werden und damit der spezifische Materialaufwand sinkt. Hierdurch kann auch der Flächenbedarf sinken. Im schlechtesten Fall kann es jedoch zum Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge trotz gleichbleibender oder sinkender Fahrzeugnutzung kommen. Dieser Zustand wird jedoch, zumindest im öffentlichen Verkehr, meistens nicht von Dauer sein.

Analog zur Kapazität hat auch die Ausweitung der Fahrleistung (FL) bei konstanter Verkehrsleistung und Kapazität einen abmildernden Einfluss auf die Auslastung (A). Dieser ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$\frac{\Delta A}{A} = -\frac{1}{1 + \frac{\Delta FL}{FL}}$$

Mögliche Vereinfachungen

Im Bereich des MIV ist diese Folge der Verkehrsleistungsänderung die Regel und verhält sich ohne äußere Einwirkungen quasi proportional. Falls nötige Daten fehlen, kann für den MIV in einigen Fällen vereinfacht abgeschätzt werden, dass die relative Fahrleistungsänderung der relativen Verkehrsleistungsänderung entspricht:

$$\frac{\Delta FL_{MIV}}{FL_{MIV}^{Ausgangszustand}} = \frac{\Delta VL_{MIV}}{VL_{MIV}^{Ausgangszustand}}$$

Die gegebene Gleichung gilt auch näherungsweise für Verkehrsmittel, die eine sehr hohe Ausgangsauslastung aufweisen. Auch im Bereich des ÖV und des Güterverkehrs findet oft eine Änderung des Verkehrsaufkommens statt. Des Weiteren ist insbesondere beim ÖV zu beachten, dass neben der erbrachten Betriebsleistung auch Leer- und Betriebsfahrten entstehen. Diese liegen zum Beispiel für manche Verkehrsbetriebe bei rund 8 % (ASEAG, 2018) der gesamten Fahrleistung. Mit einer Steigerung der Nutzwagenkilometer steigt oft auch die zurückgelegte Strecke für Betriebsfahrten. Dieser Aspekt sollte bei Möglichkeit berücksichtigt werden. Bei sehr kleinen Verkehrsleistungsänderungen im ÖV kann hingegen oft von einer alleinigen Auslastungserhöhung ausgegangen werden, sofern hier keine Daten verfügbar sein sollten. Diese impliziert eine konstante Fahrleistung.

Bei der Bahn und beim Flugverkehr sind infrastrukturelle Engpässe von Relevanz, die eine Ausweitung der Betriebsleistung hemmen können. Da die Auslastung des Flugverkehrs bereits hoch ist, kann bei der bleibenden Beschränkung der Infrastruktur (Slots) insbesondere der Einsatz größerer Flugzeuge eine mögliche Erhöhung der Verkehrsleistung kompensieren.

Im Güterverkehr werden bereits heute aufgrund der Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit hohe Auslastungsgrade erzielt. Beim Straßengüterverkehr könnte durch eine optimierte Einsatzplanung und Routenverbindung eine Auslastungserhöhung erzielt werden, aber eine Änderung der Verkehrsleistung spiegelt sich in der Regel durch eine Änderung der Fahrleistung

wider. Der Einsatz größerer Fahrzeuge ist durch das maximale zulässige Gesamtgewicht auf deutschen Straßen beschränkt, sodass oftmals der Einsatz von Fahrzeugen mit einer höheren Nutzlast nach aktueller Rechtslage ausscheidet. Beim Schienenverkehr ist ebenfalls der Einsatz höherer und längerer Züge durch die Infrastruktur und Gesetzgebung begrenzt. Hier kann ebenfalls in vielen Fällen von einer Proportionalität der Verkehrsleistung und der Fahrleistung ausgegangen werden.

Da Änderungen im Vor-/Nachlauf in vielen Fällen klein sind im Vergleich zum gesamten Verkehrsaufkommen kann davon ausgegangen werden, dass – wie oben beschrieben – beim MIV ausschließlich die Fahrleistung aus den fahrzeugseitigen Größen variiert und beim ÖV lediglich die Auslastung. Um Bandbreiten der fahrzeugseitigen Entwicklungen aufzuführen, kann jedoch auch eine Änderung der Fahrleistung im ÖV angenommen werden. Diese Vereinfachung ist jedoch nur dann zulässig, wenn keine Daten explizit gegeben sind bzw. die Entwicklungen nicht abschätzbar sind.

3.5.3.3 Berechnung der Umweltwirkungen

In der Regel können die – geänderten oder gesamten – Umweltwirkungen anhand der Fahrzeugkilometer ermittelt werden, sofern die Fahrleistung gegeben ist. Die Berechnungen sind für jedes Verkehrsmittel (X) durchzuführen. Die Gesamtwirkung entspricht der Summe aller Einzelwirkungen. Für jede Umweltkategorie gilt für eine Änderung der Umweltwirkungen die folgende Gleichung:

$$\Delta \text{Umweltwirkung}_X = \frac{\text{Umweltwirkung}}{\text{Fahrleistung}_X} \cdot \Delta FL_X$$

Wenn angenommen wird, dass durch Verkehrsleistungsänderungen auch die Auslastung variiert, kann in vielen Fällen die Wirkung der Änderung vernachlässigt werden. Eine signifikante Änderung der Auslastung hat jedoch einen Einfluss auf den Energiebedarf und somit auf die Emissionen. Sofern die Gewichtsänderung quantifizierbar ist, kann diese berücksichtigt werden, siehe z. B. die Angaben zu den Auswirkungen von Leichtbaumaßnahmen in (ifeu, 2007).

Wenn aus der Analyse der fahrzeugseitigen Größen hervorgeht, dass sich die Fahrzeugkapazität ändert, dann hat dies ebenfalls einen Einfluss auf den fahrleistungsspezifischen Energiebedarf. Dieser ist jedoch nicht nur auf das Gewicht, sondern auch auf eine Änderung des Strömungswiderstandes zurückzuführen. Eine Quantifizierung dieses Einflusses ist nur bei einer detaillierten Datengrundlage möglich. Die Auswirkungen einer geänderten Fahrzeugkapazität können mitunter einen großen Einfluss auf den Verbrauch haben.

Wenn von keinen Änderungen der Kapazität und Auslastung für ein Verkehrsmittel ausgegangen wird, dann kann eine grobe Abschätzung anhand der verkehrsleistungsspezifischen Durchschnittswerte aus der Status quo-Betrachtung erfolgen; siehe folgende Gleichung.

$$\Delta \text{Umweltwirkung}_X = \frac{\text{Umweltwirkung}}{\text{Verkehrsleistung}_X} \cdot \Delta VL_X$$

Allerdings sollte in diesem Fall ausgeführt werden, wo mögliche Unsicherheiten sein könnten.

Gerade bei zukünftigen Entwicklungen ist es schwierig genaue Werte anzugeben, sondern das Ziel der Analyse ist es eine richtungssichere Entscheidung zu ermöglichen. Um die Robustheit der erhaltenen Ergebnisse einordnen zu können, sollten daher die Ergebnisse in Bandbreiten durch Fallunterscheidungen angegeben werden, welche die Unsicherheiten aufzeigt.

Oft lassen sich bei der Datenbeschaffung keine exakten Werte ermitteln, sondern nur Bandbreiten. Zum einen kann innerhalb einer Datenquelle bereits ein Wertebereich angegeben

werden (z. B. ein Verlagerungspotenzial zwischen 5 und 10 %). Zum anderen können unterschiedliche Quellen trotz vergleichbaren Bedingungen auch unterschiedliche Werte derselben Mobilitäts- oder Fahrzeugkenngröße angeben. Sehr große Unterschiede bzw. Bandbreiten zwischen zwei Quellen weisen jedoch oft auf eine andere Methodik, Annahmen oder Daten hin und sind somit mit Bedacht zu wählen. Es empfiehlt sich allgemein bei der Berechnung sowohl einen Basiswert (oft Mittelwert) für die Quantifizierung zu verwenden als auch die Ränder der Bandbreiten (Extremwerte) mit einzubeziehen.

In der Fallunterscheidung werden die Eingangswerte innerhalb der gegebenen jeweiligen Bandbreiten variiert, um so die Auswirkungen auf die Ergebnisse ermitteln zu können. Da es eine Vielzahl an Eingabeparametern gibt, empfiehlt es sich, Parameter getrennt voneinander zu variieren. Sollten demgegenüber jedoch zwei oder mehrere Parameter voneinander abhängen, sind diese stets zusammen anzupassen. Anhand der sich ergebenden Auswirkungen auf die Resultate kann eine Einordnung der Qualität der Ergebnisse erfolgen. Sollte z. B. ein Eingabeparameter sowohl eine niedere Datenqualität als auch eine hohe Auswirkung auf die Umweltwirkungen haben, so wären die Ergebnisse mit einer hohen Unsicherheit verbunden.

Neben der Überprüfung der einzelnen Parameter empfiehlt es sich zudem eine Variation sämtlicher Parameter zugleich vorzunehmen. Es sollten hierbei die Parameter in einem sinnvollen Maße so angepasst werden, sodass sowohl minimale Umweltwirkungen als auch maximale Umweltwirkungen aus der Variation sämtlicher Eingabewerte entstehen. Dies spiegelt die mögliche Bandbreite der Ergebnisse wider.

Wichtigste Inhalte in der „Methode und Berechnung“

- ▶ Quantifizierung des Ausgangszustandes
- ▶ Quantifizierung der verkehrlichen Änderungen
- ▶ Quantifizierung der fahrzeugseitigen Änderungen
- ▶ Quantifizierung der resultierenden Umweltwirkungen

3.5.4 Auswertung und Diskussion

Nach der Quantifizierung der Umweltwirkungen sind die Resultate zu interpretieren. Insbesondere der Bezug zum Ausgangszustand hilft, das Ergebnis einzuordnen. Bei der Interpretation von relativen Einsparpotenzialen ist darauf zu achten, dass niedrige Potenziale nicht zwangsläufig uninteressant sein müssen. Wenn z. B. Verlagerungen zwar geringe relative Emissionsreduktionen bewirken, aber weitere Vorteile bringen und/oder mit geringem Aufwand umzusetzen sind, können diese durchaus sinnvoll sein.

Zur Einordnung der Ergebnisse sind auch Vergleiche zu anderen Studien mit ähnlicher Fragestellung zu ziehen. Da Verlagerungspotenziale in vielen Fällen zwischen mehreren Verkehrsmitteln bestehen, kann auch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Resultaten anderer Analysen, die den Fokus auf andere Verkehrsmittel gelegt haben, von Interesse sein. Hierbei ist jedoch auf die Vergleichbarkeit zu achten. Es sollten in der Regel nur Bilanzierungen verglichen werden, die dieselben Bilanzgrenzen aufweisen und deren Annahmen und Ausgangsdaten sich nicht grundlegend voneinander unterscheiden.

Bei der Auswertung und Darstellung ist es empfehlenswert zwischen den Lebenswegabschnitten zu differenzieren. Zum einen sind einige Schadstoffemissionen ortsabhängig, sodass z. B. Emissionen, die bei der Produktion entstehen, anders zu bewerten

sind als direkte Emissionen. Zum anderen beschränken sich viele Diskussionen und Analysen lediglich auf direkte Emissionen ohne Berücksichtigung von z. B. Infrastrukturaufwendungen. Eine fehlende Trennung der Lebenswegabschnitte kann zu Missverständnissen führen.

Des Weiteren sind die getroffenen Annahmen und Unsicherheiten der verwendeten Daten kritisch zu beschreiben. Eingangsdaten sind in der Regel einer Bandbreite unterworfen, die bei der Berechnung der Umweltwirkungen Berücksichtigung finden sollte. So kann aus der Verwendung eines leicht abweichenden Eingangswertes eine komplett unterschiedliche Umweltwirkung resultieren. Diese Unsicherheiten sind zu identifizieren und zu interpretieren. Neben den Eingangsdaten sind auch die eigenen Annahmen kritisch zu hinterfragen.

Wichtigste Inhalte in der „Auswertung und Diskussion“

- ▶ Beschreibung und Interpretation der erhaltenen Ergebnisse
- ▶ Reflexion der getroffenen Annahmen und der Unsicherheiten in den verwendeten Daten
- ▶ Ableitung einer richtungssicheren Entscheidungshilfe

4 Ökologische Bilanzierung der Verkehrsarten

In diesem Kapitel werden ausgewählte Ergebnisse der ökologischen Bilanzierung für die verschiedenen methodischen Herangehensweisen gezeigt und diskutiert. Weitere Ergebnisse, insbesondere für den Status quo-Fall für Deutschland 2017, sind im Anhang tabellarisch dargestellt.

4.1 Potenzialbetrachtung

Für die Potenzialbetrachtung werden exemplarisch zwei Ergebnisse gezeigt:

- ▶ Spezifische Treibhausgasemissionen des Personenfernverkehrs in Deutschland 2017 mit durchschnittlicher Auslastung (je Personenkilometer) und mit voller Auslastung (je Platzkilometer).
- ▶ Spezifische Treibhausgasemissionen verschiedener Antriebskonzepte bei Pkw im Vergleich.

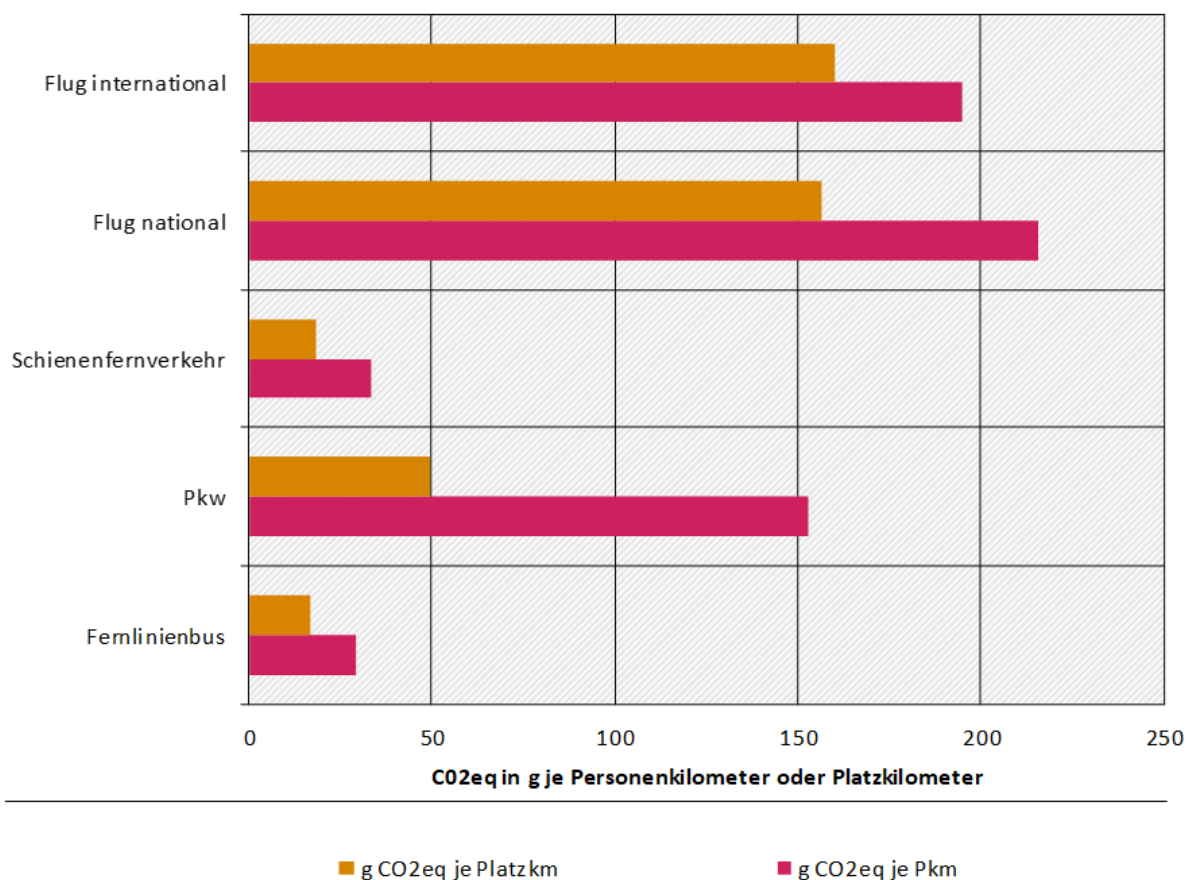
4.1.1 Potenziale der Verkehrsmittel bei voller Auslastung

Als Anwendungsfall einer Potenzialbetrachtung wurden die Treibhausgasemissionen für einzelne Verkehrsmittel in Deutschland 2017 in einer Variante mit voller Auslastung im Vergleich zur durchschnittlichen Auslastung (siehe Anhang A.1) ermittelt. Dargestellt sind die Emissionen der Verkehrsmittel im Personenfernverkehr je Personenkilometer (durchschnittliche Auslastung) und je Platzkilometer (volle Auslastung).

Die Kennzahlen beinhalten jeweils den Fahrzeugbetrieb (TTW) und die Energiebereitstellung (WTT). Eine Darstellung der Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung erweist sich in diesem Fall als nicht möglich bzw. nicht sinnvoll. Dies liegt daran, dass eine Änderung der Auslastung zunächst keinen Einfluss auf die Umweltwirkungen in diesen Lebenswegabschnitten hat, wenn man die gleichen Lebensfahrleistungen der Fahrzeuge und die gleichen Fahrleistungen auf der Infrastruktur wie beim Status quo mit der durchschnittlichen Auslastung unterstellt und den Einfluss der Auslastung auf das Fahrzeuggewicht vernachlässigt.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 für die Klimawirkung im Personenfernverkehr dargestellt. Es wird deutlich, dass der Pkw-Verkehr mit seiner niedrigen durchschnittlichen Auslastung auch das größte Minderungspotenzial hat. Es wird aber auch sichtbar, dass ein Pkw selbst mit der maximalen Auslastung eine höhere spezifische Klimawirkung hat als Bahn und Fernlinienbus in der Status quo-Betrachtung. Dies zeigt, dass auch ein z. B. im Freizeit- oder Urlaubsverkehr besser ausgelasteter Pkw schlechter abschneidet als der Schienenfernverkehr oder Fernlinienbus (beide bei durchschnittlicher Nutzung).

Abbildung 7: Klimawirkung des Personenfernverkehrs in Deutschland 2017 – Vergleich durchschnittliche und volle Auslastung



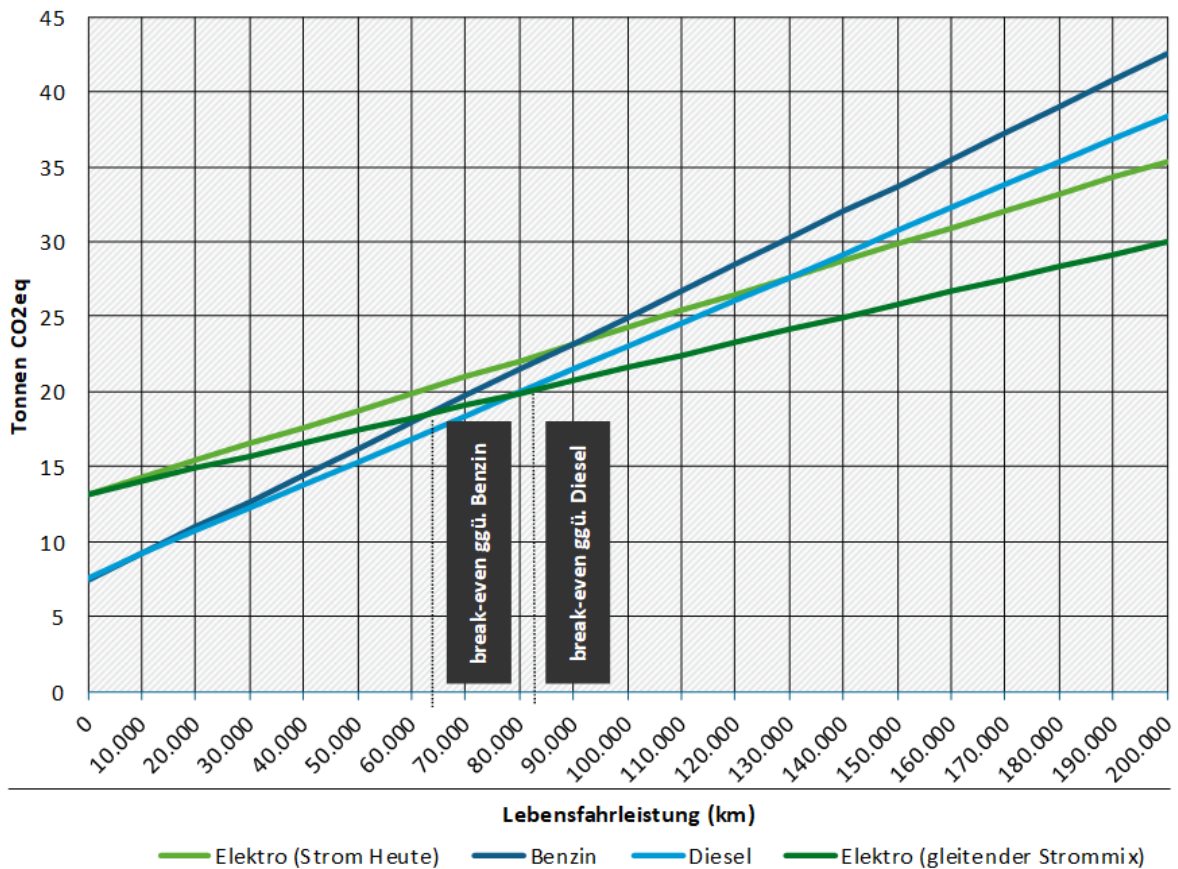
Anmerkung: Treibhausgasemissionen (IPCC 2013) für den Fahrzeugbetrieb (TTW) und die Energiebereitstellung (WTT); Flugverkehr einschließlich zusätzlicher Klimawirkungen (EWF)
 Quelle: eigene Berechnungen

4.1.2 Antriebsvergleich bei Personenkraftwagen

Ein Anwendungsfall für eine Potentialbetrachtung ist der Vergleich von Pkw mit verschiedenen Antriebskonzepten. Dabei wird zunächst unabhängig von der konkreten Fahrzeugnutzung ein technisch vergleichbares Fahrzeug definiert, oftmals ein Kompaktklasse-Pkw.

In (Helms et al., 2019) wird eine solcher Technologievergleich für Diesel-, Benzin- und Elektro-Pkw durchgeführt. Hier wird jeweils ein Kompaktklasse Pkw mit gleichem Fahrzeugrumpf und gleicher Motorleistung (etwa 100 kW) modelliert. Verändert werden lediglich die bei den verschiedenen Antriebskonzepten differierenden Bauteile (Antriebsstrang und Energiespeicher). Das Leergewicht des hier betrachteten Pkw liegt in der Benzinvariante bei etwa 1,3 t. Für den batterieelektrischen Pkw wird dabei eine heute üblicherweise in diesem Segment verbaute Batteriekapazität von 35 kWh angesetzt, was etwa einer Norm-Reichweite von 300 km entspricht. Da es heute noch große Unsicherheiten bei den Lebensfahrleistungen der batterieelektrischen Pkw gibt, wird jeweils ermittelt, nach wie vielen Kilometer der Elektro-Pkw besser abschneidet als die Verbrenner. Zudem werden die Einsparungen in den Treibhausgasemissionen nach einer heute üblichen Lebensdauer von 150.000 km bzw. 200.000 km ausgewiesen.

Abbildung 8: Treibhausgasemissionen eines Kompaktklasse Pkw über den Lebensweg in Abhängigkeit der Lebensfahrleistung bei durchschnittlicher Nutzung



Quelle: (Helms et al., 2019)

Unter der Annahme, dass sich die Lebensfahrleistungen der verschiedenen Pkw zwischen den Antriebskonzepten nicht unterscheiden lautet das Fazit aus (Helms et al., 2019), dass ein Elektro-Pkw über seine Lebensdauer bei den Treibhausgasemissionen immer besser abschneidet als ein vergleichbares Verbrennerfahrzeug. Der Break-even Punkt des Kompaktklasse Elektro-Pkw liegt gegenüber dem Benzinern heute bei etwa 60.000 km und gegenüber dem Diesel- Pkw bei etwa 80.000 km, wenn von einem gleitenden Strommix ausgegangen wird. Ein heute gekaufter Elektro-Pkw wird im Laufe seines Fahrzeuglebens einen veränderlichen Fahrstrommix nutzen, bei dem der Anteil erneuerbarer Energien im Laufe der Jahre steigt. Daher wird in (Helms et al., 2019) neben der Berechnung mit einem heutigen Strommix auch ein gleitender Strommix zwischen heute und dem Jahr 2030 berücksichtigt, der zu einer früheren Amortisation der zusätzlichen Emissionen der Fahrzeugherstellung eines batterieelektrischen Pkw führt. Werden in Elektro-Pkw größere Akkus verbaut, verschiebt sich der Break-even hingehen zu größeren Lebensfahrleistungen.

Die Schwierigkeit bei diesem rein technischen Vergleich des Potentials der verschiedenen Antriebe liegt darin, dass sich Auslegung, Lebensdauer und Jahresfahrleistung der Pkw mit den verschiedenen Antrieben teilweise deutlich unterscheiden. So ersetzt ein Elektro-Pkw vermutlich nicht exakt einen gleichwertigen Verbrenner, da er oftmals eine deutlich geringere Reichweite hat und damit ein anderes Nutzungsmuster haben kann. Zudem sind viele Angaben wie z. B. die Akkulebensdauer oder die Lebensfahrleistung bei den Elektro-Pkw noch relativ unsicher, da der Markt sich hier gegenüber den etablierten Verbrenner-Pkw deutlich dynamischer verändert. In Zukunft werden Verbesserungen insbesondere in der Zellfertigung

von Lithium-Ionen Akkus durch eine veränderte Zellchemie, steigende Energiedichten, energieeffizientere Fertigungsprozesse sowie eine weniger treibhausgasintensive Bereitstellung der zur Zellfertigung benötigten Energie erwartet, so dass die Treibhausgasemissionen in der Herstellung des Elektro-Pkw sinken dürften.

Wird eine ähnliche Auswertung mit den Status-Quo Ergebnissen aus dem Verkehrsartenvergleich durchgeführt, ergibt sich ein etwas anderes Bild. Der Hauptgrund dafür ist, dass in der Status- Quo Betrachtung immer ein durchschnittlicher Pkw unter heute typischen Nutzungsbedingungen bilanziert wird. Damit haben die mittleren Pkw je nach Antriebskonzept unterschiedliche Fahrzeugeigenschaften. So sind zum Beispiel die Diesel-Pkw im Mittel schwerer und leistungsstärker als Benzin- oder Elektro-Pkw. Weiterhin hat der Diesel-Pkw deutlich höhere Jahresfahrleistungen. Bei einer gleichen kalendarischen Lebensdauer wird also ein Diesel-Pkw mehr als doppelt so viel gefahren wie ein Elektro- oder Benzin- Pkw. Da die Lebensfahrleistung die Abschreibung der Lasten für die Fahrzeugherstellung/-entsorgung bestimmt, führt dies in der Status- Quo Betrachtung zu höheren Emissionen für die weniger genutzten Elektro-Pkw.

Tabelle 19: Fahrzeugeigenschaften der Pkw im Antriebsvergleich (Status quo)

	Elektro, niedrige FL	Elektro, durchschnittliche* FL	Benzin	Diesel
Leergewicht	1,3 t	1,3 t	1,3 t	1,7 t
Motorleistung	87 kW	87 kW	87 kW	110 kW
Akkugröße	35 kWh	35 kWh		
Jahresfahrleistung	8.542 km/a	13.000 km/a	10.677 km/a	20.287 km/a
Lebensfahrleistung nach 13 Jahren	111.045 km nach FL Erhebung	169.000 km nach MiD 2017	138.807 km nach FL Erhebung 2014	263.733 km nach FL Erhebung 2014

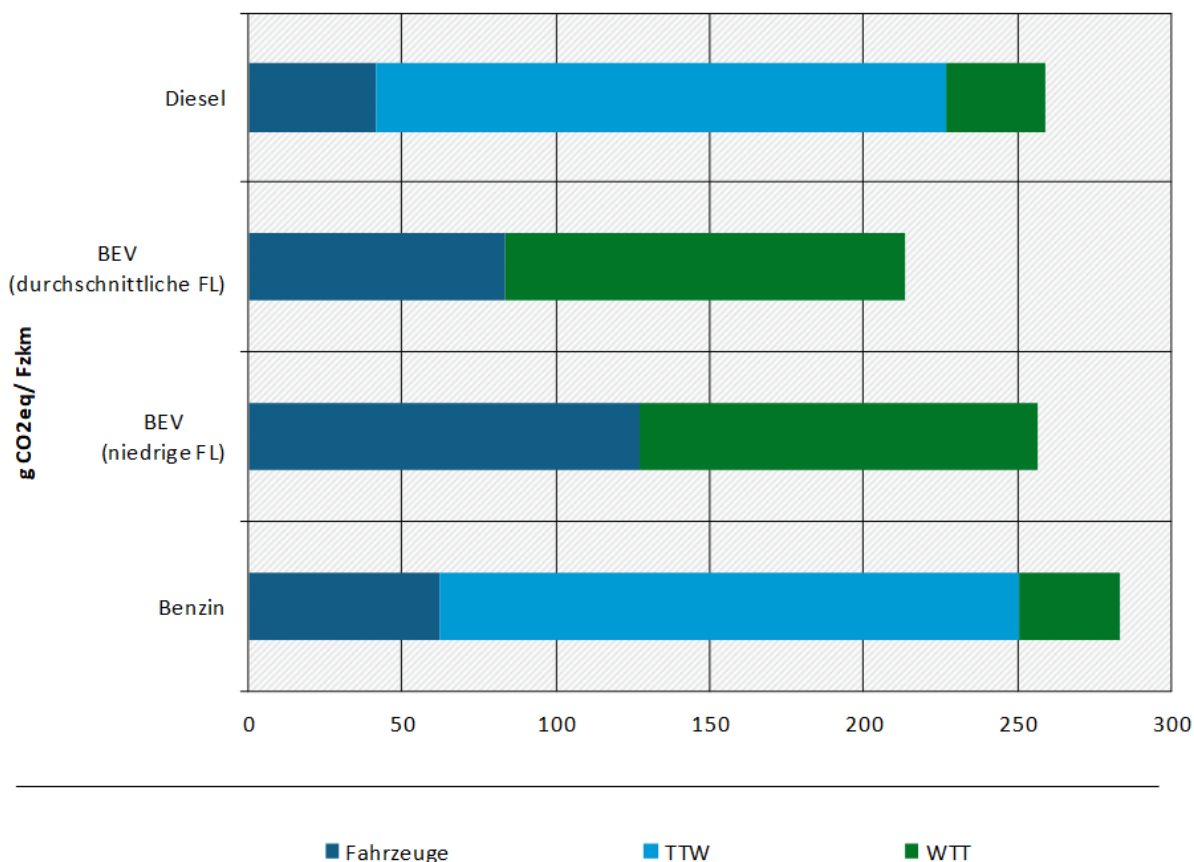
Anmerkung: *Die Jahresfahrleistung von 13.000 km/a entspricht in etwa der durchschnittlichen Fahrleistung eines Pkw in Deutschland.

Quellen: Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al., 2016) sowie MiD 2017 (Nobis / Kuhnimhof, 2019)

Die Jahresfahrleistungen für die Pkw im Verkehrsartenvergleich stammen aus der Fahrleistungserhebung von (Bäumer et al., 2016) und damit aus dem Jahr 2014. Es handelt sich damit um ältere Daten. Die Fahrleistungen aus der Fahrleistungserhebung beziehen sich bei den Elektro-Pkw weiterhin auf relativ wenige Fahrzeuge. Zudem ist zu vermuten, dass sich in den letzten Jahren mit dem steigenden Markthochlauf der Elektro-Pkw die Fahrleistungen verändert haben. So liegen die mittleren Jahresfahrleistungen der Elektro-Pkw in der MiD 2017 (Nobis / Kuhnimhof, 2019) bei etwa 13.000 km und damit deutlich höher als in der Fahrleistungserhebung von 2014. Die Werte aus MiD basieren auf einer Stichtagbefragung zum Mobilitätsverhalten, sie sind damit weniger belastbar als die Werte der Fahrleistungserhebung, da sie lediglich auf Hochrechnungen basieren.

Um diesen Unsicherheiten bei den Gesamtfahrleistungen der heutigen Elektro-Pkw Rechnung zu tragen, werden in der folgenden Abbildung beide Fälle gezeigt.

Abbildung 9: Treibhausgasemissionen eines mittleren Pkw im Antriebsvergleich (Status quo-Betrachtung mit deutschem Strommix 2017 – EE-Anteil 36 %)



Quelle: eigene Berechnungen

Mit den Fahrleistungen nach der Fahrleistungserhebung 2014 und damit auf Basis der älteren Daten schneiden beim Status-Quo ein mittlerer Elektro- und ein mittlerer Diesel-Pkw bei den Treibhausgasemissionen ähnlich ab, da hier die höheren Herstellungsemissionen des Elektro-Pkw nur über relativ wenige Kilometer abgeschrieben werden. Die Treibhausgasemissionen des Benzin-Pkw liegen pro Fahrzeugkilometer etwas höher. Werden hingegen die höheren Fahrleistungen für den Elektro-Pkw nach MiD 2017 angesetzt, hat der Elektro-Pkw auch bei der Verwendung eines heutigen Strommixes gegenüber den beiden Verbrennungsfahrzeugen deutlich geringere Treibhausgasemissionen. Bisher gibt es nur wenige verlässliche Aussagen dazu, wie lange ein Elektrofahrzeug leben wird. Generell gelten Elektrofahrzeuge als wartungsärmer und damit auch langlebiger als Verbrenner-Fahrzeuge. Es ist also gut denkbar, dass künftig auch Elektro-Pkw ein „zweites Leben“ (im Ausland) bekommen werden, offen ist jedoch aktuell die Frage, ob dann ein neuer Akku eingesetzt wird.

Für einen Vergleich von Antriebskonzepten ist eine Status- Quo Betrachtung wenig geeignet. Aber auch eine reine Potentialbetrachtung greift zu kurz, wenn die reale Nutzung der Fahrzeuge berücksichtigt werden soll. Sinnvoll ist dann eine systemische Herangehensweise, die das Mobilitätsverhalten von Personen in den Mittelpunkt stellt und die vorhandenen (multimodalen) Alternativen bilanziert. Ein interessanter Betrachtungsfall könnte z. B. das Mobilitätsverhalten einer Person im Jahresverlauf sein, bei dem verschiedene Varianten diesen Bedarf zu befriedigen neben einander gestellt werden (z. B. Verlagerung von Fernreisen auf die Bahn sowie Ersatz der Pendelfahrten zur Arbeit durch einen kleinen Elektro-Pkw).

4.2 Betrachtung der typischen Nutzung (Status quo)

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse der Status quo-Betrachtung für Deutschland im Jahr 2017 dargestellt. Es werden alle Wirkungskategorien und Lebenswegabschnitte betrachtet. Dabei wird für die Auswahl eine einheitliche Struktur gewählt, damit die Ergebnisse auch für verschiedene Wirkungskategorien vergleichbar sind.

- ▶ Ergebnisse für ausgewählte Verkehrsmittel in Deutschland 2017 für die mittlere Fahrzeugflotte bei durchschnittlicher Auslastung und Betriebsweise
- ▶ Zuordnung der Verkehrsmittel zu den Transportarten Personen- und Güterverkehr
- ▶ Bei einigen Kategorien Aufteilung des Personenverkehrs in Nah- und Fernverkehr

Eine differenzierte Zuordnung nach Art der Mobilität bzw. des Transports oder nach Betrachtungsräumen wird nicht vorgenommen, da

- ▶ Verkehrsmittel nicht immer eindeutig zuzuordnen sind (z. B. kann Personenfernverkehr auch mit Nahverkehrszügen erbracht werden),
- ▶ für eine Durchschnittsbetrachtung Deutschland keine ausreichenden empirischen Daten für solche Differenzierungen vorliegen (z. B. zur Aufteilung der Pkw-Fahr- und Pkw-Verkehrsleistung auf Nah-, Regional-, Fernverkehr).

4.2.1 Treibhausgasemissionen und Luftschadstoffe

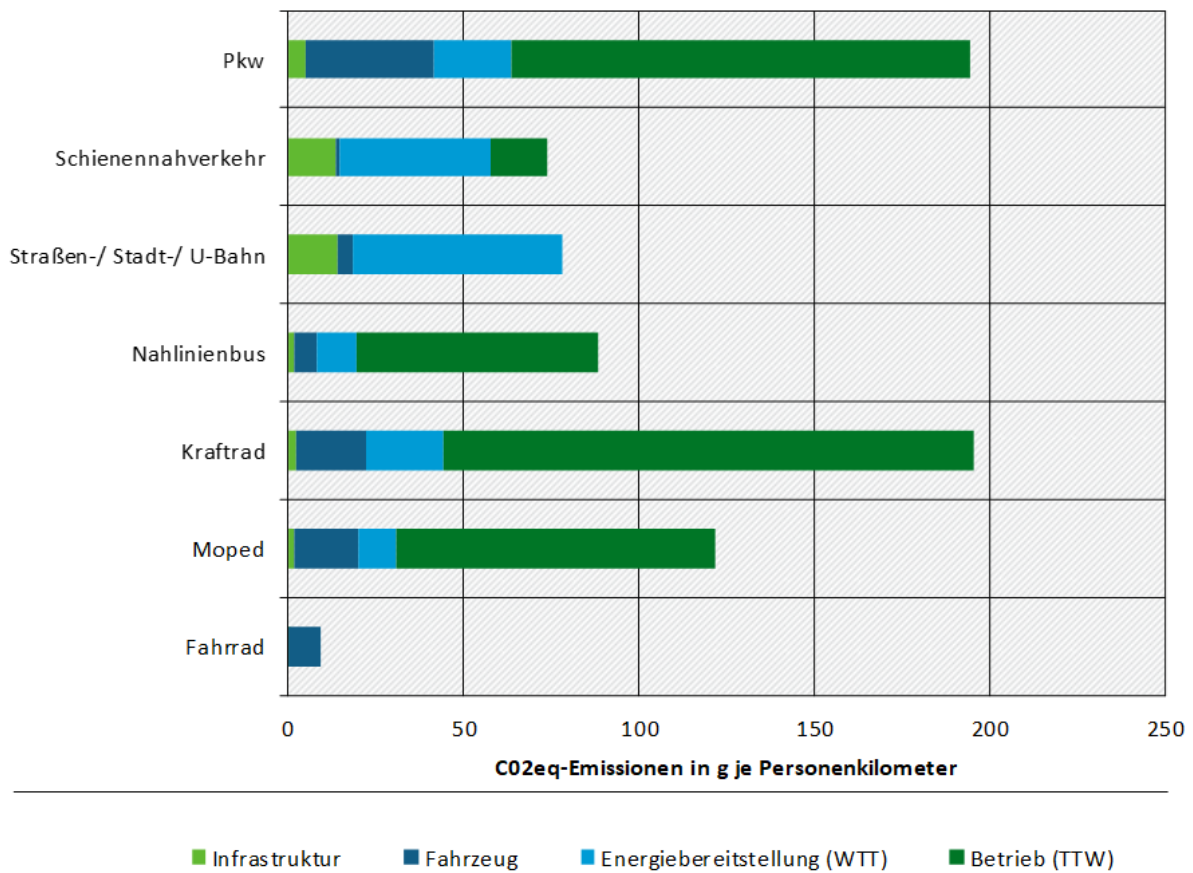
Es werden die Treibhausgasemissionen als CO₂-Äquivalente nach (IPCC 2013) und separat die CO₂-Äquivalente durch die zusätzliche Klimawirkung des Flugverkehrs in großen Flughöhen durch Berücksichtigung des EWF (emission weighting factor) gezeigt (beschrieben in Kapitel 2.4.3) und als „Klimawirkung“ bezeichnet. Bei den Luftschadstoffen werden die Stickstoffoxid- und die PM₁₀-Emissionen dargestellt. Weitere Ergebnisse befinden sich im Anhang.

Die Ergebnisse der einzelnen Lebenswegabschnitte werden unabhängig von ihrer zeitlichen und räumlichen Verursachung in den Darstellungen separat gezeigt. Es sind somit die Gesamtemissionen aus allen Lebenswegabschnitten direkt ablesbar aber auch der Beitrag der einzelnen Lebenswegabschnitte, die je nach Wirkungskategorie und Fragestellung unterschiedlich zu bewerten ist.

4.2.1.1 Personenverkehr

Zunächst werden hier die **Klimawirkungen** des Personenverkehrs ausgewertet. Dabei zeigt sich, dass die gesamten Treibhausgasemissionen immer noch stark vom Fahrzeugbetrieb sowie der Energiebereitstellung abhängen. Dies liegt vor allem an den hohen Anteilen an fossiler Energie, die im Verkehrsbereich heute eingesetzt werden.

Abbildung 10: Klimawirkung des Personennahverkehrs in Deutschland 2017

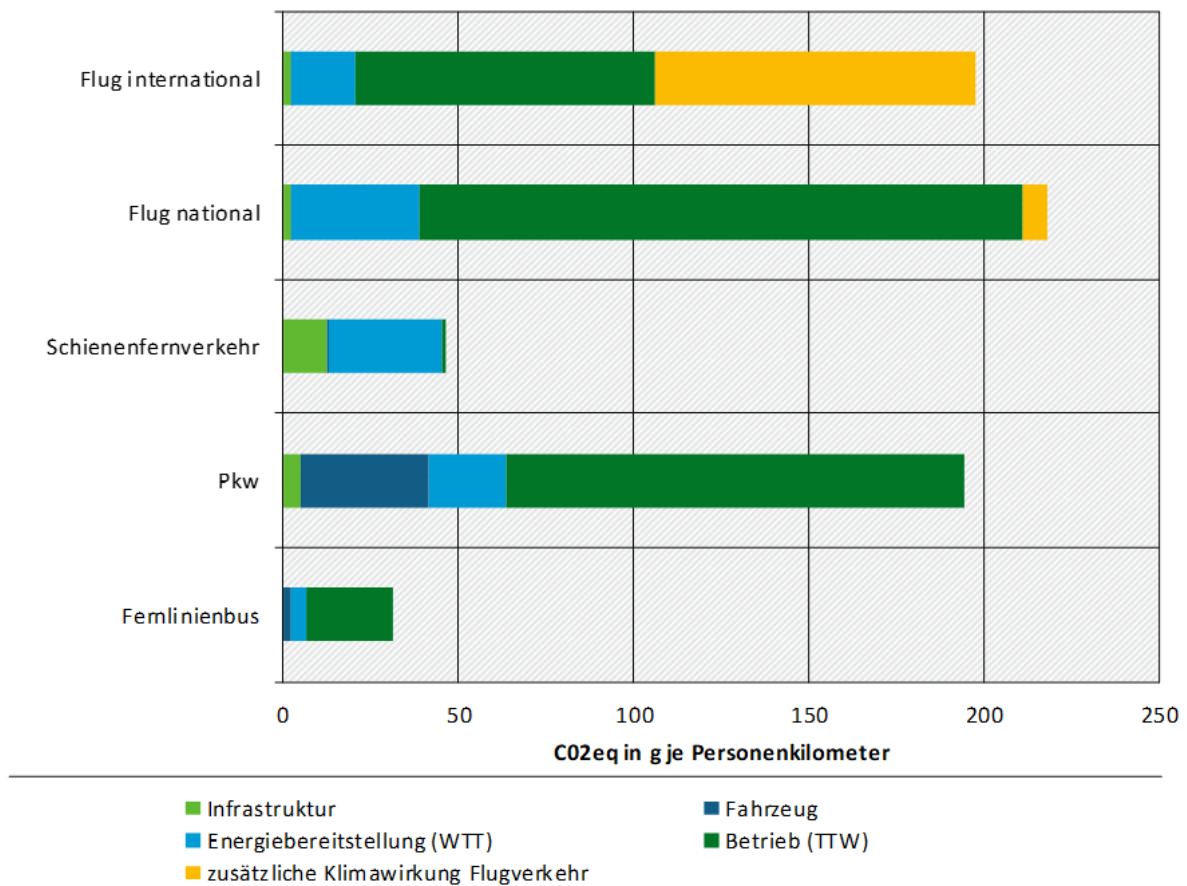


Quelle: eigene Berechnungen

Beim Personennahverkehr weist der motorisierte Individualverkehr jeweils die höchsten Klimawirkungen auf, die über die gesamte Prozesskette gerechnet bei fast 200 g CO_{2eq} pro Personenkilometer liegen. Deutlich besser schneidet der öffentliche Personenverkehr ab, wobei die Nahlinienbusse, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen sowie der Schienennahverkehr ähnliche Treibhausgasemissionen haben. Besonders gut schneidet bei der Klimawirkung das Fahrrad ab, das keine Antriebsenergie benötigt. Einen größeren Einfluss auf die Klimawirkung hat vor allem im Straßenverkehr die Fahrzeugherstellung, beim Schienenverkehr eher die Infrastruktur.

Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Personenfernverkehr, hier dominiert ebenfalls der WTW Teil die Klimawirkungen. Neben den Treibhausgasemissionen der verschiedenen Lebenswegabschnitte werden bei den Flugzeugen auch die zusätzlichen Klimawirkungen durch Emissionen in großen Höhen berücksichtigt.

Abbildung 11: Klimawirkung des Personenfernverkehrs in Deutschland 2017



Quelle: eigene Berechnungen

Während die öffentlichen Verkehrsmittel (Fernzüge und Fernlinienbusse) pro Personenkilometer relativ geringe Klimawirkungen haben, kommen die Pkw auf etwa die vierfachen Treibhausgasemissionen. Die größten Klimawirkungen entfallen auf die Flugzeuge im nationalen und internationalen Personenfernverkehr.

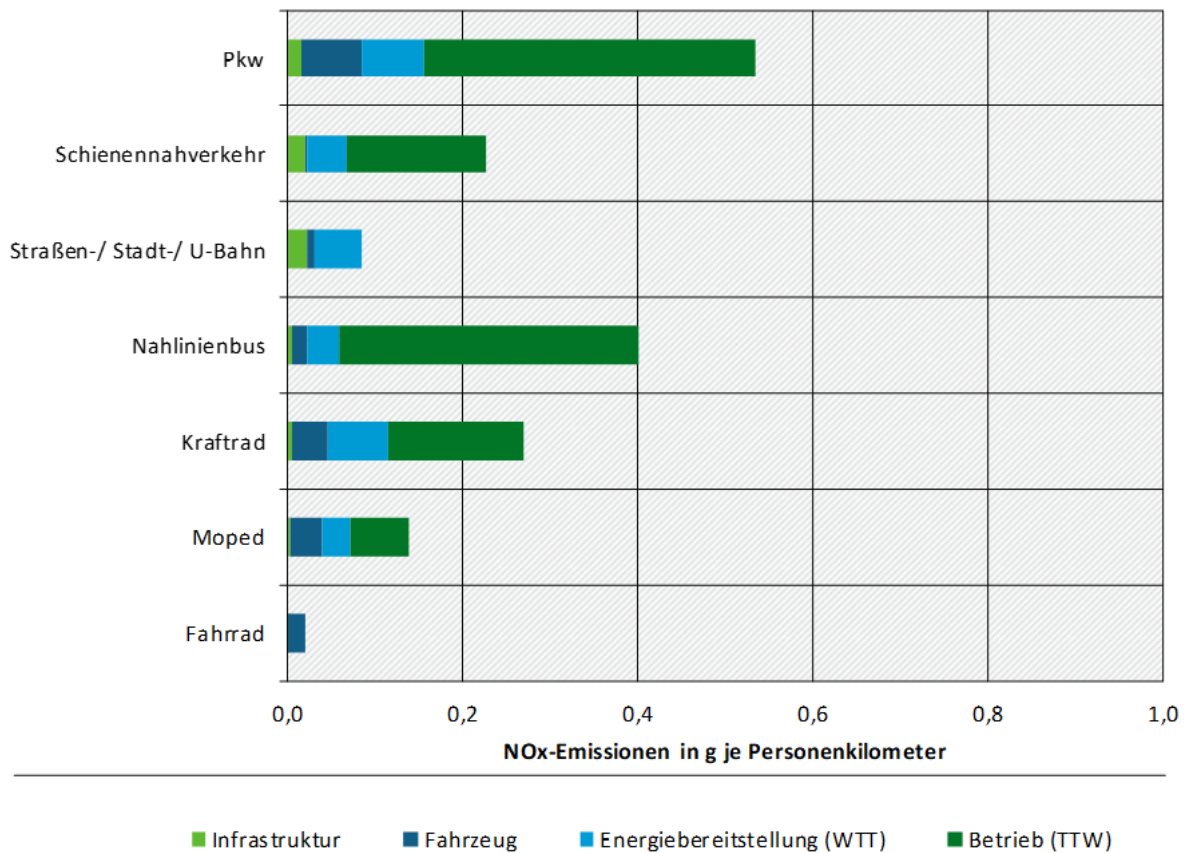
Während der zusätzliche Klimafaktor im nationalen Flugverkehr mit einem EWF von 1,04 nur einen geringen Einfluss hat, liegt dieser Faktor bei den internationalen Flügen bei 2,08. Dies begründet sich dadurch, dass im nationalen Flugverkehr nur kurzzeitig die entsprechenden Flughöhen erreicht werden, in denen der Klimafaktor zum Tragen kommt, da ein hoher Anteil des Gesamtflugs (und damit auch der Treibhausgasemissionen) für Start und Landung anfallen. Da die Klimawirkung nicht nur von der Höhe der Emissionen des Flugzeugs abhängig ist, sondern auch von äußeren Faktoren – siehe Abschnitt 2.4.3 – ist sie für einen konkreten Einzelflug nicht genau bestimmbar, sondern nur als Durchschnitt aller Flüge eines längeren Zeitraumes ungefähr abschätzbar.

Ähnlich wie bei den Klimawirkungen werden auch die **Stickoxidemissionen** sehr stark vom Fahrzeugbetrieb und der Energiebereitstellung beeinflusst.

Bezüglich der Infrastrukturbeiträge bei den Emissionen lässt sich feststellen, dass der spezifische Beitrag der Schieneninfrastruktur pro Personenkilometer höher ist als bei den anderen Infrastrukturen, gefolgt vom MIV. Im Vergleich zu den Vorgängerstudien (siehe Kapitel 2.3.4) hat sich der Beitrag der Straßeninfrastrukturen durch die Aktualisierung der Wirkungsfaktoren deutlich verringert. Auch hat sich das Allokationsverfahren bei den

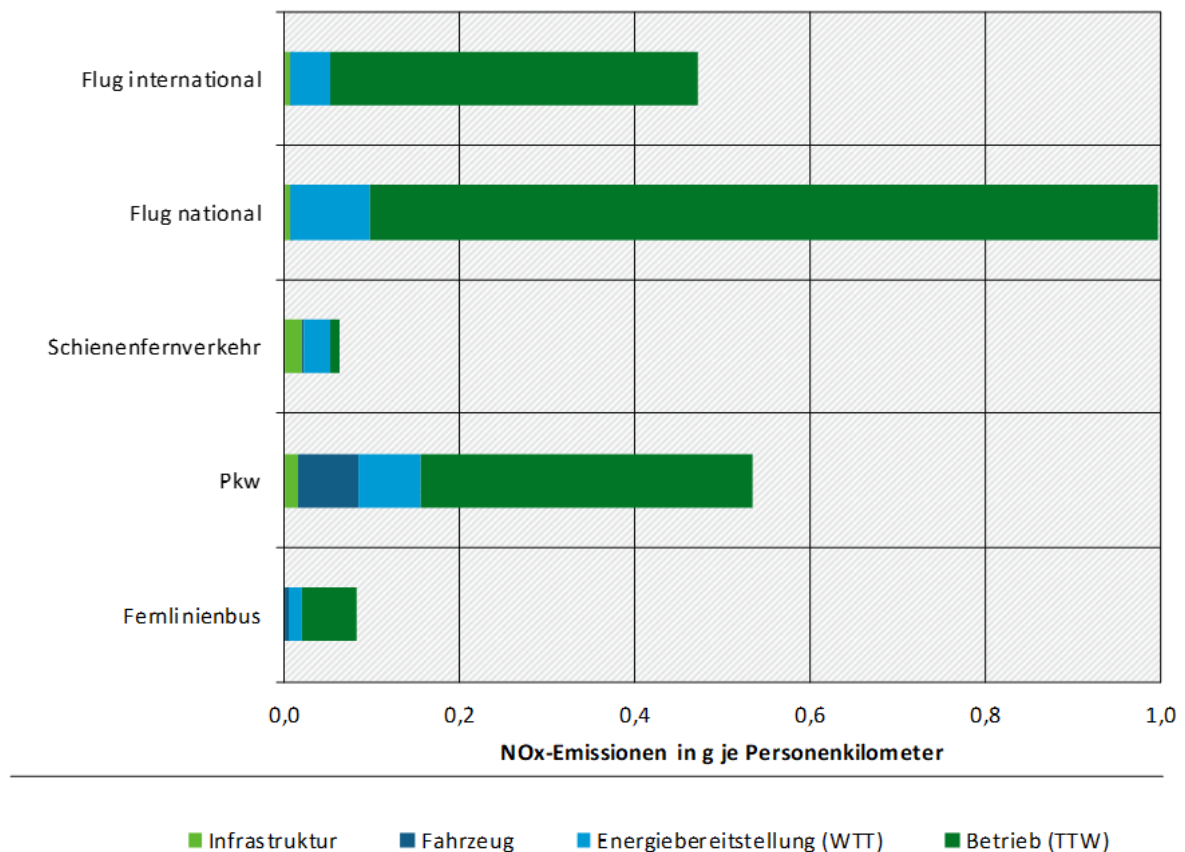
Straßeninfrastrukturen verändert, so dass dem Personenverkehr höhere Lasten als dem Straßengüterverkehr angelastet werden.

Abbildung 12: NO_x-Emissionen im Personennahverkehr in Deutschland 2017



Die höchsten Stickoxidemissionen haben beim Personennahverkehr die Pkw, darauf folgen die weiteren Straßenfahrzeuge mit ihren immer noch verhältnismäßig hohen Auspuffemissionen an Stickoxiden. Einen deutlich geringeren Einfluss auf die Stickoxidemissionen haben die Fahrzeuge (relevant vor allem bei den Straßenfahrzeugen) und die Infrastruktur (relevant vor allem bei den Schienenfahrzeugen).

Abbildung 13: NO_x-Emissionen im Personenfernverkehr in Deutschland 2017

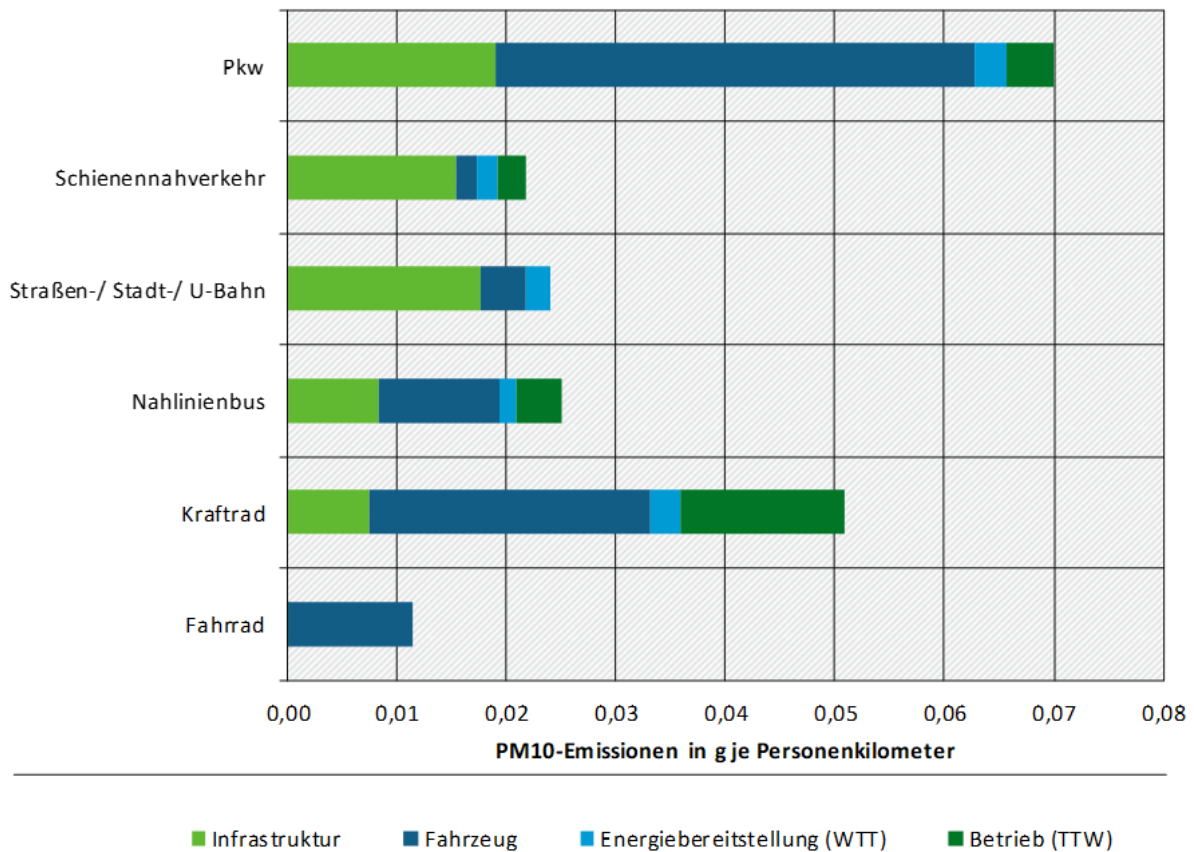


Quelle: eigene Berechnungen

Im Personenfernverkehr hat das Flugzeug im nationalen Bereich die höchsten Stickoxidemissionen, dahinter folgen der Pkw und der internationale Flugverkehr. Am besten schneiden die öffentlichen Verkehrsmittel (Schienenpersonenfernverkehr sowie Fernlinienbus) ab.

Da in den letzten Jahren die Abgasreinigung bei den Verbrennungsfahrzeugen immer besser geworden ist, sind die verbrennungsbedingten Feinstaubbelastungen durch diese sehr gering. Daher werden die **PM₁₀-Emissionen** heute deutlich von der Fahrzeugherstellung und der Infrastruktur dominiert. Einzige Ausnahme sind die Krafträder, speziell Kleinkrafträder, deren Abgasreinigung noch nicht so aufwendig ist.

Abbildung 14: PM₁₀-Emissionen im Personennahverkehr in Deutschland 2017

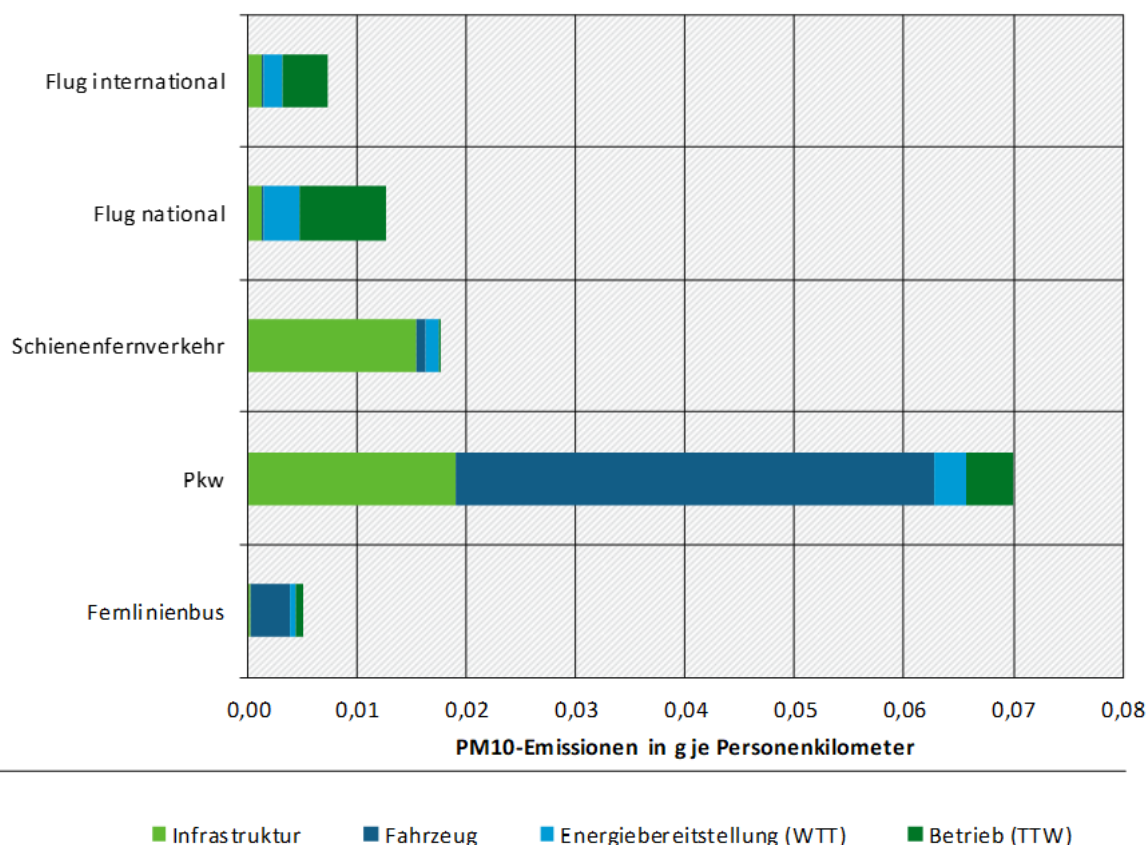


Quelle: eigene Berechnungen

Anmerkung: Im Bild nicht gezeigt sind die Mopeds (2-Takter) mit ihren extrem hohen PM₁₀-Emissionen von 0,23 g/ Pkm (davon entfallen 0,2 g auf die Auspuffemissionen)

Auch im Personenfernverkehr spielen vor allem die Fahrzeugherstellung und die Infrastruktur eine große Rolle bei den Feinstaubemissionen.

Abbildung 15: PM₁₀-Emissionen im Personenfernverkehr in Deutschland 2017



Quelle: eigene Berechnungen

Dabei hat der Pkw, trotz seiner relativ geringen TTW-Emissionen, die über den Lebenszyklus gerechneten höchsten Feinstaubemissionen.

Insbesondere die (innerstädtisch) emittierten Feinstaubemissionen mit kleinen Fraktionen (PM_{2.5}) haben eine besonders große Schadwirkung, da sie viele Menschen einatmen. Triebwerksemissionen der Flugzeuge in Reiseflughöhe, Vorkettenemissionen in Kraftwerken oder bei der Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung haben also eine andere Wirkung. Zudem gibt es hier nicht nur örtliche, sondern auch zeitliche Unterschiede. So enthalten z. B. die Emissionen für die Infrastruktur sowohl die laufenden Erhaltungsaufwendungen als auch die Emissionen des (teilweise bereits vor längerer Zeit erfolgten) Infrastrukturaufbaus, die über die Lebensdauer abgeschrieben werden. Bei den Fahrzeugen werden nicht alle Emissionen im Inland emittiert, da viele Fahrzeuge, Fahrzeugteile oder Rohstoffe aus dem Ausland importiert werden.

Im Rahmen dieses Vorhabens ist es jedoch nicht möglich, eine differenziertere Schadstoffbetrachtung vorzunehmen. Zudem fehlen beim Fahrzeugbetrieb auch die (mit extrem großen Unsicherheiten) behafteten Feinstaubemissionen durch Abrieb und Aufwirbelung, welche einen großen Einfluss auf die Gesamtbilanz haben.

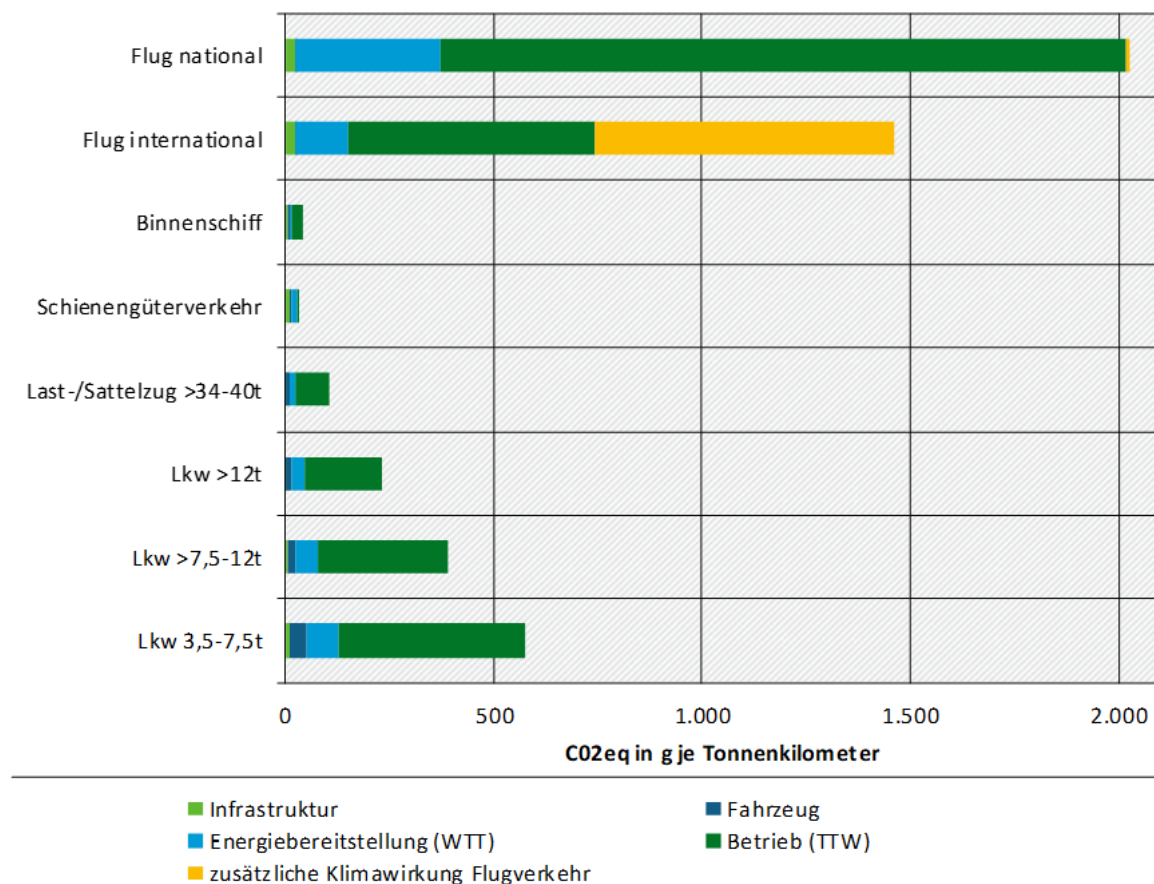
Wo die NO_x-Emissionen bei den Infrastrukturanteilen ähnlich zu denen der THG-Emissionen sind, ergibt sich für die PM₁₀-Emissionen ein deutlich anderes Bild. Die Emissionen der Infrastruktur haben einen großen Anteil an den spezifischen Emissionen und dominieren sogar die Emissionen für den Schienenverkehr. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die Vorkettenprozesse für die mineralischen Materialien verhältnismäßig staubintensiv sind und hier auch große Mengen nachgefragt werden. Aber wie bereits angemerkt, ist der spezifische

Beitrag der Vorketten (also Infrastruktur, Fahrzeuge, Energiebereitstellung) kein guter Indikator für die tatsächliche Schadwirkung.

4.2.1.2 Güterverkehr

Auch bei der Auswertung der **Klimawirkungen** im Güterverkehr werden neben den Treibhausgasemissionen die zusätzlichen Klimawirkungen der Flugzeuge berücksichtigt. Ähnlich wie beim Personenverkehr werden die Klimawirkungen sehr stark vom Fahrzeugbetrieb und von der Energiebereitstellung beeinflusst.

Abbildung 16: Klimawirkung im Güterverkehr in Deutschland 2017



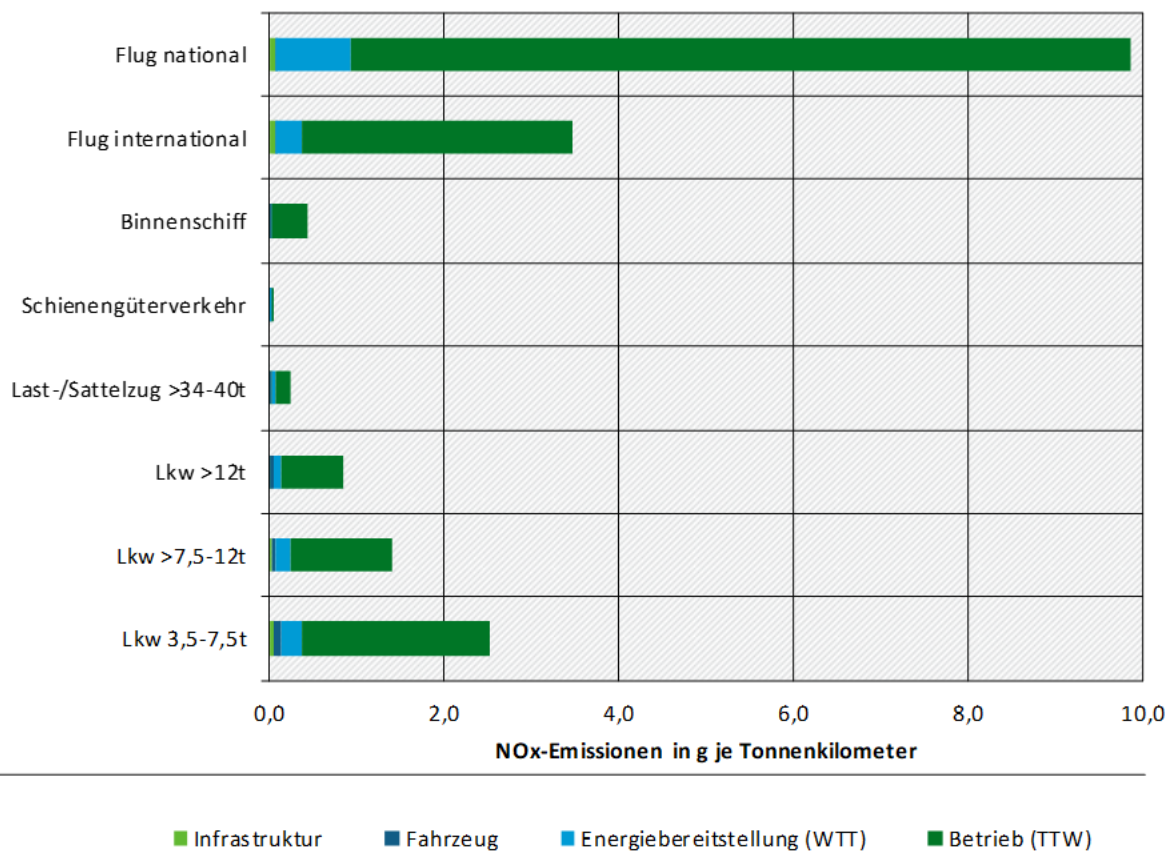
Quelle: eigene Berechnungen

Die mit Abstand höchsten Klimawirkungen treten bei der Luftfracht auf. Immer noch hohe Klimawirkungen hat der Straßengüterverkehr, wobei die größeren Last- und Sattelzüge deutlich besser als die kleineren Lkw abschneiden. Die geringsten Klimawirkungen haben der Schienengüterverkehr und die Binnenschiffe.

Bei den Infrastrukturen ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Personenverkehren. Der spezifische Beitrag bei der Schiene ist größer als bei der Straße, deren Emissionen geringer als in Vorgängerstudien sind. Einerseits, weil die absoluten Emissionsmengen durch aktualisierte Emissionsfaktoren gesunken sind, andererseits weil die Allokationsmethodik den MIV stärker belastet.

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei den **Stickoxidemissionen**, auch hier dominiert der WTW Teil der Prozesskette.

Abbildung 17: NO_x-Emissionen im Güterverkehr in Deutschland 2017

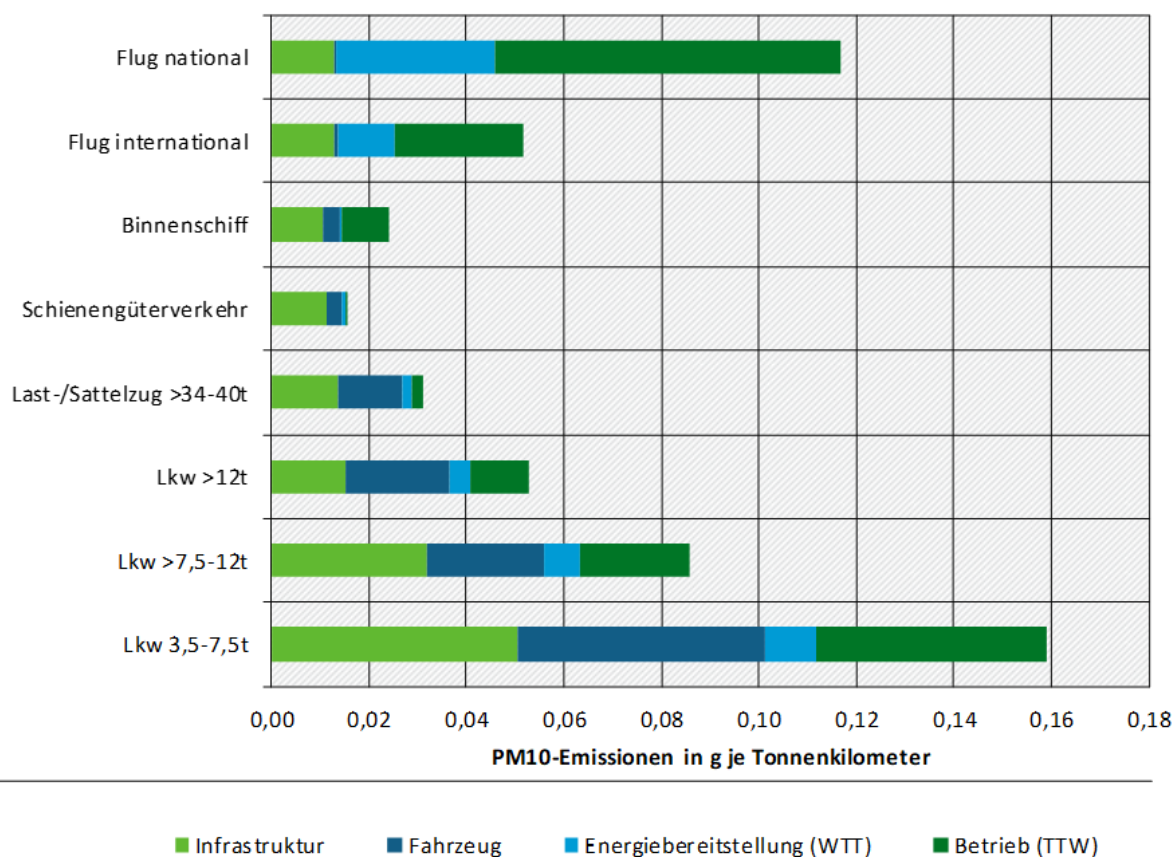


Quelle: eigene Berechnungen

Besonders hohe Stickoxidemissionen treten in der nationalen Luftfracht auf. Besser schneiden die schweren Nutzfahrzeuge ab (auch hier ist der Last-/Sattelzug am besten). Während die Binnenschiffe sogar etwas mehr Stickoxide als die Last- und Sattelzüge emittieren (auf Grund der etwas schlechteren Abgasreinigung), hat der Schienengüterverkehr die geringsten NO_x-Emissionen.

Die **PM₁₀-Emissionen** im Güterverkehr verteilen sich unterschiedlich auf die Lebenswegabschnitte.

Abbildung 18: PM₁₀-Emissionen im Güterverkehr in Deutschland 2017



Quelle: eigene Berechnungen

Bei den Schienenfahrzeugen hat die Infrastruktur den höchsten Anteil, während bei den Straßenfahrzeugen auch die Fahrzeugherstellung relevant ist. Am besten schneiden hier die Last- und Sattelzüge sowie der Schienengüterverkehr und die Binnenschiffe ab. Die anderen schweren Nutzfahrzeuge weisen deutlich höhere PM₁₀-Emissionen auf.

4.2.2 Kumulierter Energie- und Rohstoffaufwand

In diesem Kapitel werden sowohl die kumulierten Energieverbräuche (KEA) als auch die kumulierten Rohstoffaufwände (KRA) ausgewertet.

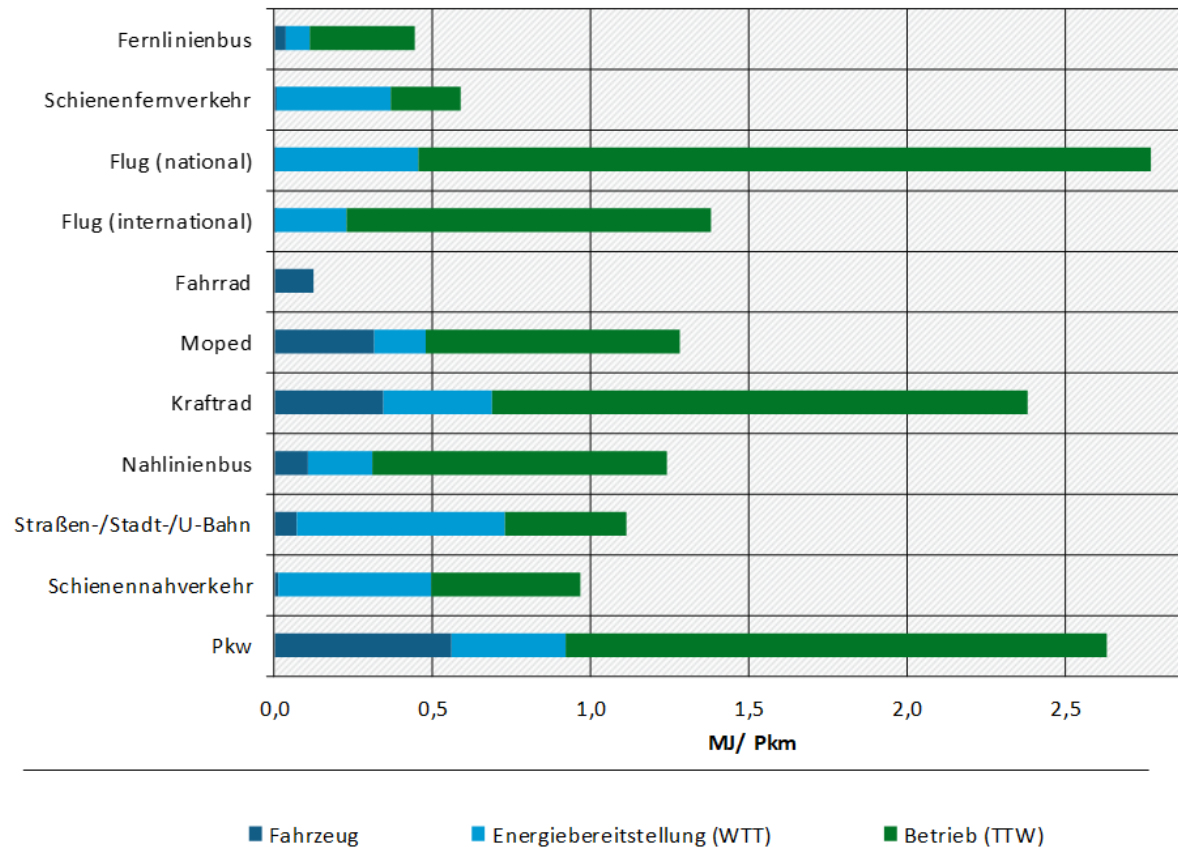
Die Rohstoffbetrachtungen erfolgen dabei anhand des kumulierten Rohstoffaufwandes (KRA) mineralisch und metallisch. Da eine reine Addierung aller KRA-Bestandteile nur wenig Aussagekraft besitzt, wird auf eine derartige Darstellung verzichtet. Die verschiedenen Lebensabschnitte tragen unterschiedlich stark zu den Rohstoffaufwänden bei. Während die Kraftstoff- und Strombereitstellung die fossilen und biogenen Rohstoffaufwände dominiert, haben metallische Rohstoffe vor allem bei der Fahrzeugbereitstellung aber auch bei der Infrastruktur einen Einfluss. Die Infrastruktur hingegen hat einen sehr großen Einfluss auf die mineralischen Rohstoffe.

Da die Ergebnisse beim fossilen und biogenen KRA sehr ähnlich wie der kumulierte Rohstoffaufwand ausfallen, wird hier auf eine getrennte Ausweisung des KRA fossil und KRA biogen verzichtet.

4.2.2.1 Personenverkehr

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) zeigt die von den verschiedenen Verkehrsarten benötigten Primärenergienmengen über die gesamte Prozesskette hinweg.

Abbildung 19: Kumulierter Energieaufwand im Personenverkehr in Deutschland 2017



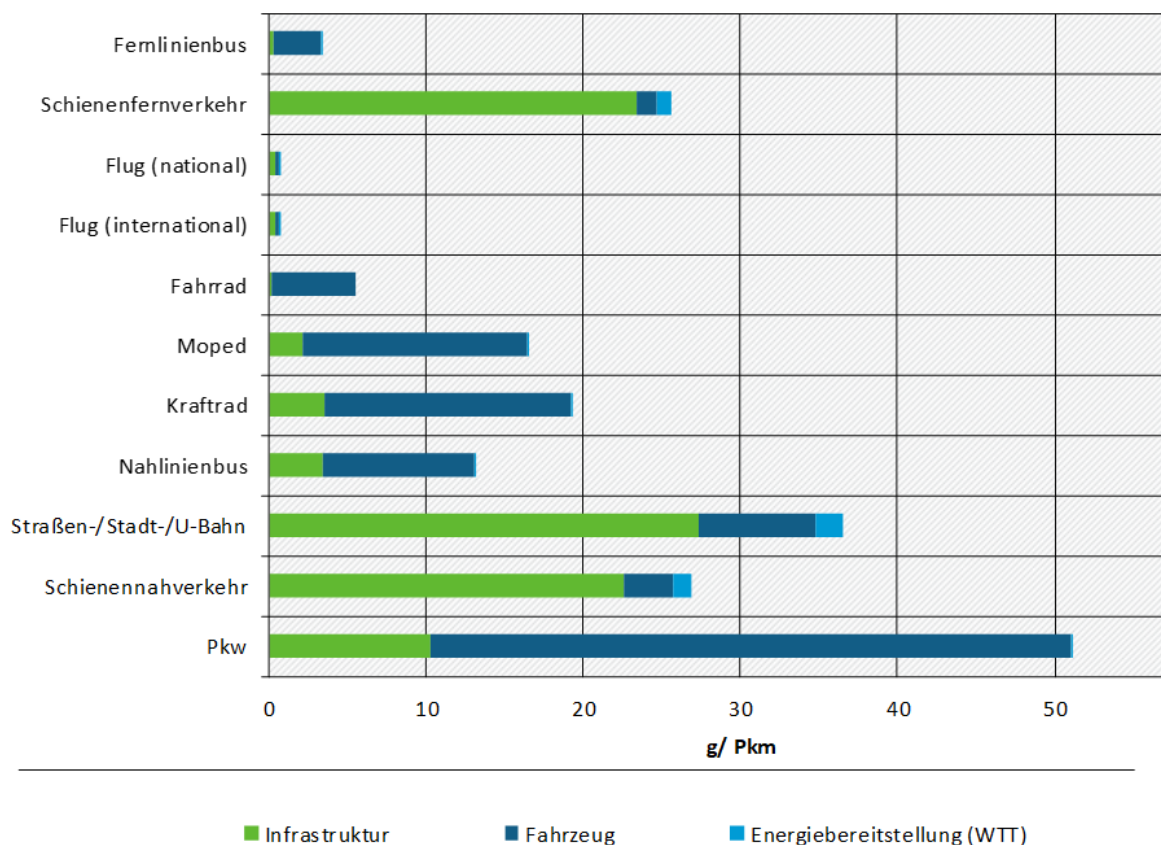
Quelle: eigene Berechnungen.

Die im Betrieb benötigte Energie (TTW) zeigt jeweils die Energieeffizienz der Verkehrsmittel an. Die Energieeffizienz der Fahrzeuge wird, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben ist, vor allem von den Fahrwiderständen (z. B. Luft-/ Rollwiderstand), der Fahrzeugmasse sowie der Geschwindigkeit und der Antriebsart beeinflusst. Über den Einbezug der Energiebereitstellung sowie der Fahrzeugherstellung werden auch die in den Fahrzeugen enthaltenen oder bei der Kraftstoff-/Fahrzeugbereitstellung benötigten Energien mitberücksichtigt. Da der KEA immer auf die Verkehrsleistung bezogen wird, schneiden hier Verkehrsmittel besser ab, bei denen im Mittel eine höhere Auslastung vorliegt.

Beim kumulierten Energieaufwand schneiden neben den Fahrrädern (für die kein Strom oder Kraftstoff als Antriebsenergie benötigt wird) sowohl der Fernlinienbus als auch der Schienenfernverkehr aufgrund ihrer geringen Energieverbräuche und ihrer relativ guten Auslastungen sehr gut ab. Hohe Energieaufwände sind hingegen im motorisierten Individualverkehr vor allem bei den Pkw und Zweiräder zu verzeichnen. Speziell beim Pkw ist dies auch auf die im Mittel geringe mittlere Auslastung zurückzuführen. Obwohl die mittleren Auslastungen im Flugverkehr verhältnismäßig hoch sind, liegen hier hohe kumulierte Energieverbräuche vor, da ein Flugzeug pro Platzkilometer bereits eine niedrigere Energieeffizienz aufweist. Diese Zusammenhänge sind auch bei der Potenzialbetrachtung in Kapitel 4.1.1 erklärt.

Die in den Fahrzeugen und in der Infrastruktur verbauten sowie zur Energiebereitstellung benötigten metallischen und mineralischen Rohstoffe werden im kumulierten Rohstoffaufwand (KRA) abgebildet.

Abbildung 20: Kumulierter Rohstoffaufwand (metallisch) im Personenverkehr in Deutschland 2017



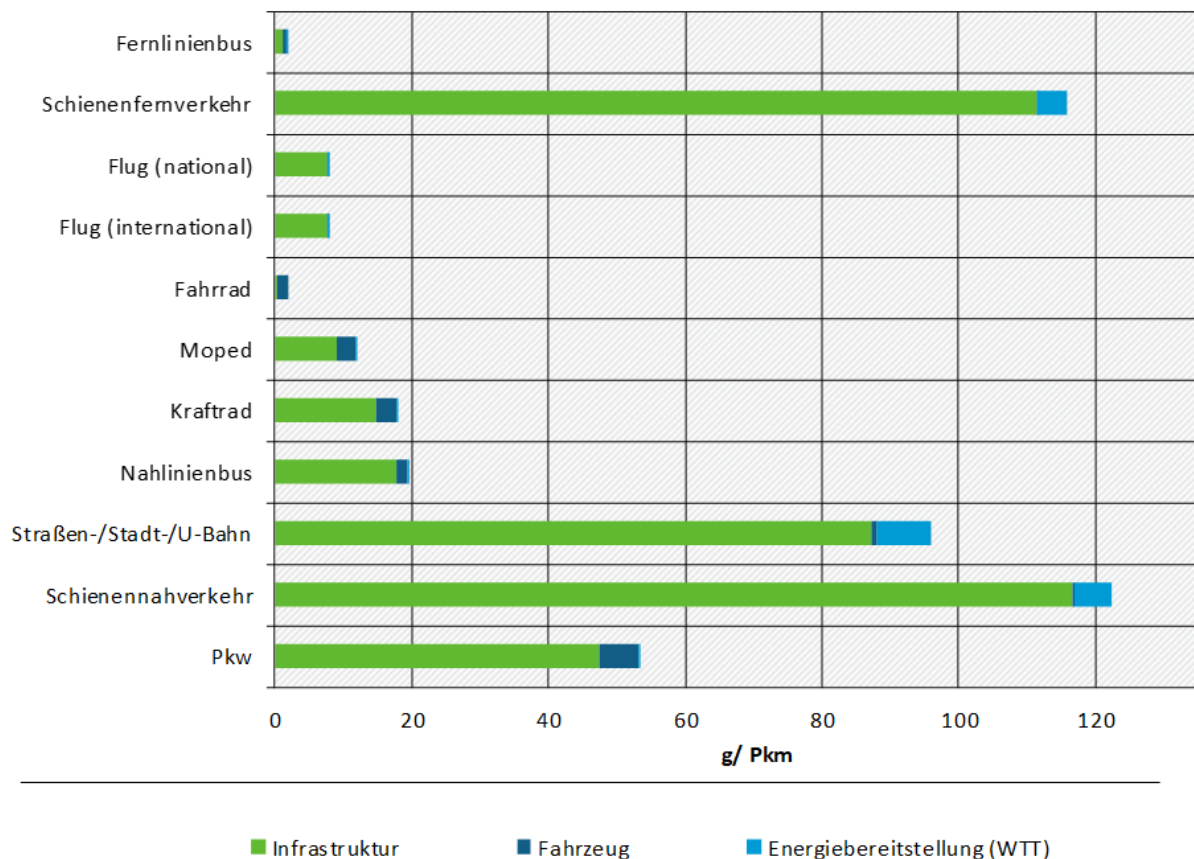
Quelle: eigene Berechnungen

Der metallische kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) wird vor allem bei den straßengebundenen Verkehrsarten stark von der Fahrzeugherstellung dominiert. Den höchsten KRA metallisch haben die Pkw, die pro transportierte Person ein hohes Fahrzeuggewicht aufweisen und keine so großen Lebensfahrleistungen wie die öffentlichen Verkehrsmittel haben. Zudem werden für die Pkw Herstellung viele metallische Rohstoffe gebraucht, die teilweise (wie z. B. das in der Abgasnachbehandlung verwendete Platin) einen sehr hohen KRA-Faktor haben.

Bei den Schienenfahrzeugen hingegen dominiert beim KRA metallisch die Infrastruktur. Hier sind vor allem die stromführenden Oberleitungen (insb. Kupfer) und der Stahl für die Schienen intensive Verbraucher. Wobei das Gewicht beim Stahl mit ca. 75 % des Gesamtaufwandes liegt. Kupfer kommt hier durch den hohen Recyclinganteil auf rund 20 % der gesamten Aufwendungen bei den Infrastrukturen.

Der KRA mineralisch zeigt, welche Mengen an Steinen und Erden sowie sonstigen mineralischen Rohstoffen benötigt werden. Er wird für alle Verkehrsmittel von der Infrastrukturbereitstellung dominiert.

Abbildung 21: Kumulierter Rohstoffaufwand (mineralisch) im Personenverkehr in Deutschland 2017



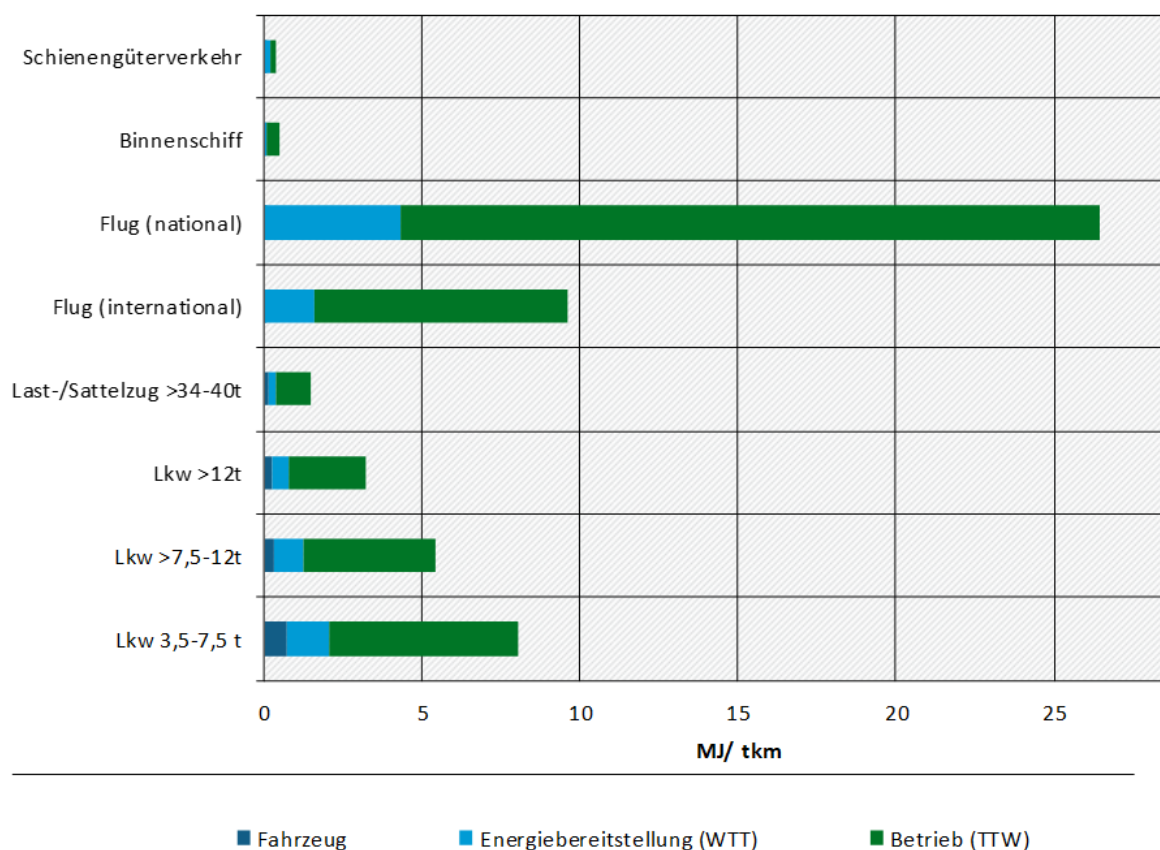
Quelle: eigene Berechnungen

Die großen Treiber des mineralischen KRA sind in absteigender Reihenfolge Kies und Schotter, Asphalt und Beton. Wobei Kies und Schotter über alle Verkehrsträger hinweg mehr als 50 % des mineralischen KRA ausmachen. Für die einzelnen Verkehrsträger ist diese Reihenfolge jedoch nicht immer gesetzt. Beim Luftverkehr ist Beton sehr viel relevanter, für die Straßeninfrastrukturen ist Asphalt fast genauso relevant wie der reine Kies und Schotter – bei den Schieneninfrastrukturen ist wiederum fast ausschließlich Kies und Schotter von Bedeutung. Aufgrund der Masse der Materialien dominiert die Infrastrukturbereitstellung auch die spezifischen Aufwände der einzelnen Verkehrsträger. Wenn man die Anteile hier mit z. B. den Anteilen der Infrastruktur bei den Klimawirkungen vergleicht erkennt man, warum der KRA als reiner Indikator für Umweltwirkungen oder Belastung nur bedingt geeignet ist.

4.2.2.2 Güterverkehr

Auch im Güterverkehr erfolgt eine Auswertung des kumulierten Energieaufwandes (KEA) sowie des kumulierten Rohstoffaufwandes (KRA).

Abbildung 22: Kumulierter Energieaufwand im Güterverkehr in Deutschland 2017

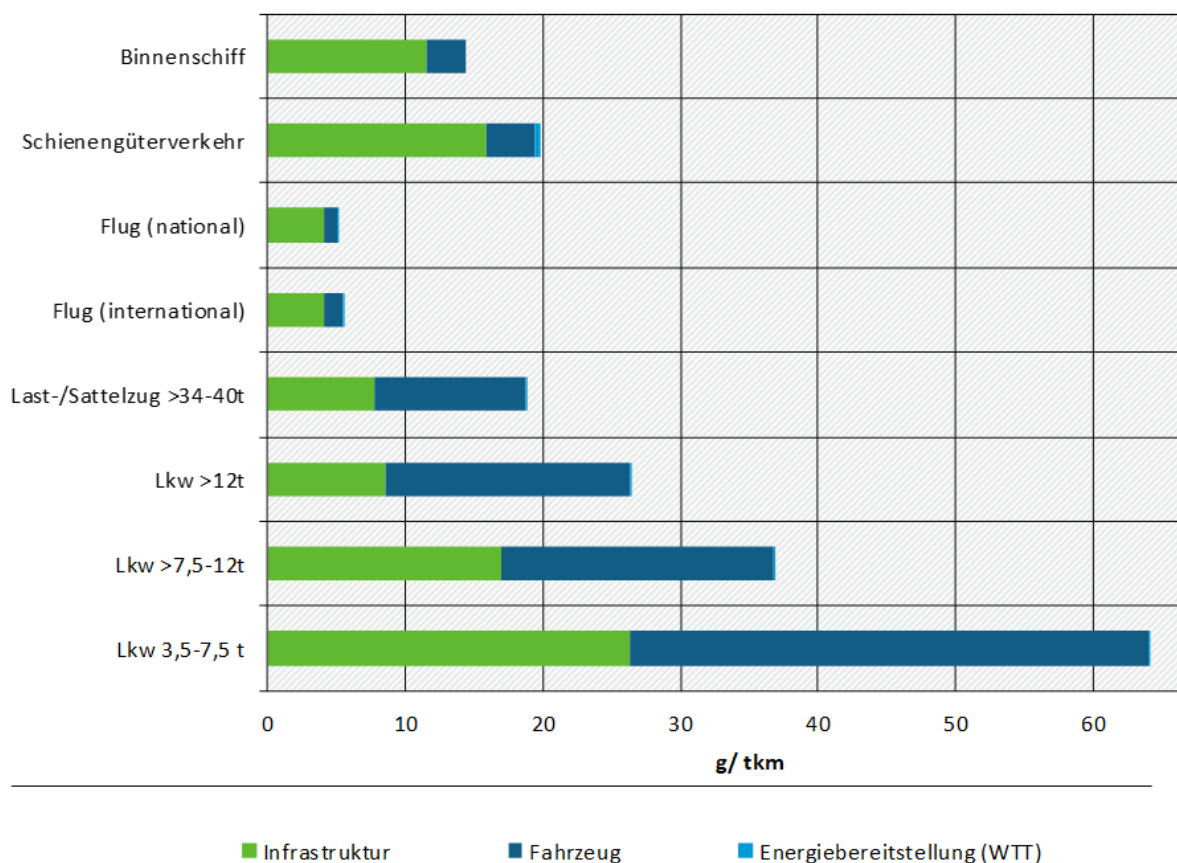


Quelle: eigene Berechnungen

Den geringsten kumulierten Energieaufwand haben pro Tonnenkilometer die Binnenschiffe und der Schienengüterverkehr. Beide Verkehrsmittel zeichnen sich durch relativ langsame Reisegeschwindigkeiten, große Gefäßgrößen und eine gute Energieeffizienz aus. Straßentransporte schneiden bereits deutlich schlechter ab, wobei die größeren Last- und Sattelzüge deutliche Vorteile gegenüber den kleineren Lkw haben. Am schlechtesten schneiden beim KEA im Güterverkehr die Flugzeuge ab. Dies liegt neben der relativ schlechten Energieeffizienz auch an der gewählten Allokationsmethode zwischen Güter- und Personentransport, da die Umlegung auf Personen- und Tonnen anhand des Gewichtes der Fracht und der Passagiere erfolgt (siehe auch Kapitel 2.2.6).

Beim metallischen Rohstoffaufwand (KRA) sind beim Güterverkehr ähnliche Effekte wie beim Personenverkehr zu beobachten.

Abbildung 23: Kumulierter Rohstoffaufwand (metallisch) im Güterverkehr in Deutschland 2017

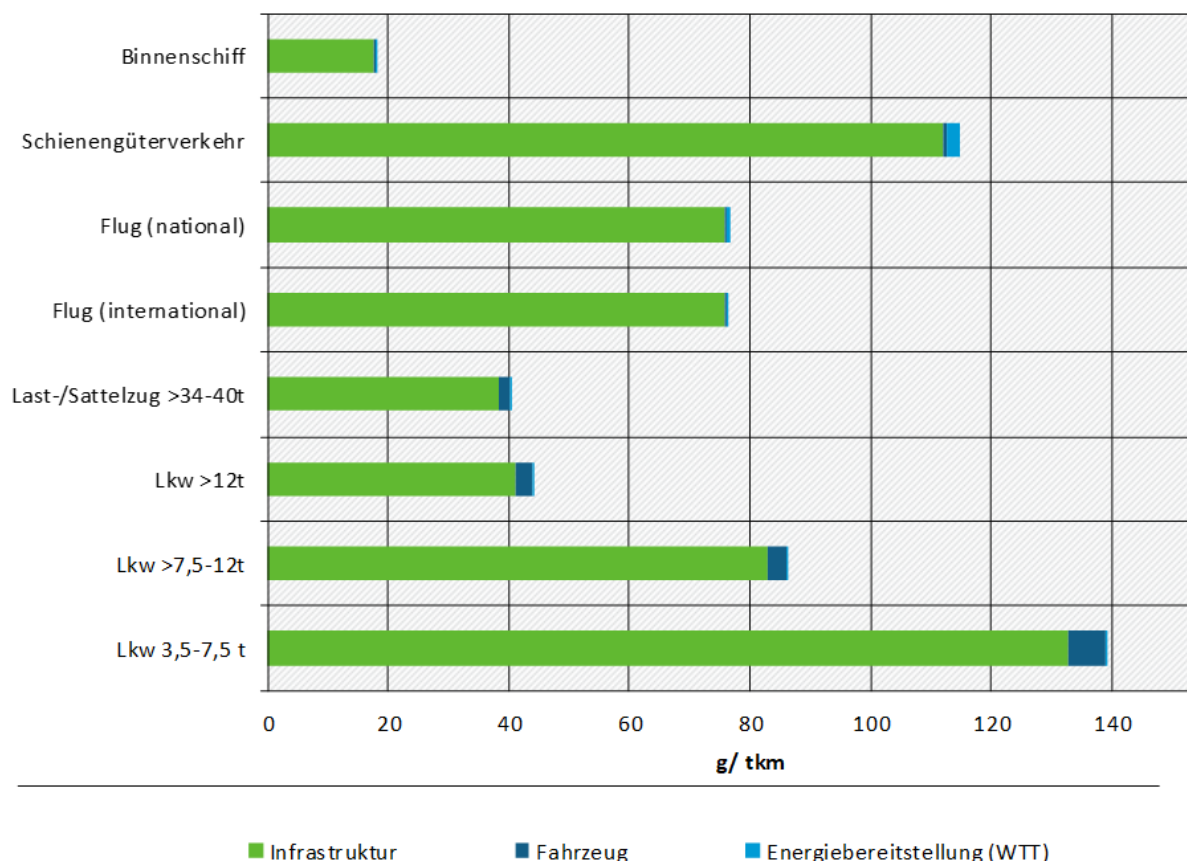


Quelle: eigene Berechnungen

Auch hier ist der metallische Rohstoffaufwand (KRA) für die Straßenfahrzeuge höher als für Schienenfahrzeuge, Flugzeuge oder Binnenschiff. Dafür dominiert beim Schienenverkehr der Aufwand für die Infrastruktur den metallischen Rohstoffaufwand, wobei dieser auch bei den Straßenfahrzeugen noch einen nennenswerten Einfluss hat. Der überraschend hohe (da gut ersichtliche) Wert bei den Binnenschiffen trägt sich aus verschiedenen Quellen zusammen. Ein Teil kommt von Schleusen und Hafenanlagen, der größere jedoch über die Uferbefestigungen von beschrifteten Flüssen und Kanälen.¹¹

¹¹ Nähere Informationen dazu finden sich in den in Kapitel 2.3.4 genannten Quellen.

Abbildung 24: Kumulierter Rohstoffaufwand (mineralisch) im Güterverkehr in Deutschland 2017



Quelle: eigene Berechnungen

Für den Güterverkehr ergibt sich beim mineralischen KRA ein dem Personenverkehr sehr ähnliches Bild: Es dominiert vor allem Kies und Schotter, mit Asphalt und Beton auf den nachliegenden Rängen. Beim Schiffsverkehr ist Beton jedoch der Hauptträger, gefolgt von Kies und Schotter.

4.2.3 Flächenbedarf

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der durchschnittlichen Flächenbelegung für den Personen- und Güterverkehr pro Verkehrsleistung gemäß der im Kapitel 2.4.5 dargestellten Methodik. Sämtliche Resultate sind immer für beide Allokationsprinzipien dargestellt.

Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen die Resultate zur durchschnittlichen Flächenbelegung für den gesamten Personenverkehr in Deutschland.

Abbildung 25: Durchschnittliche Flächenbelegung im Personenverkehr in Deutschland 2017, Variante A (Allokation nach temporärer Flächenbelegung und Fahrleistung)

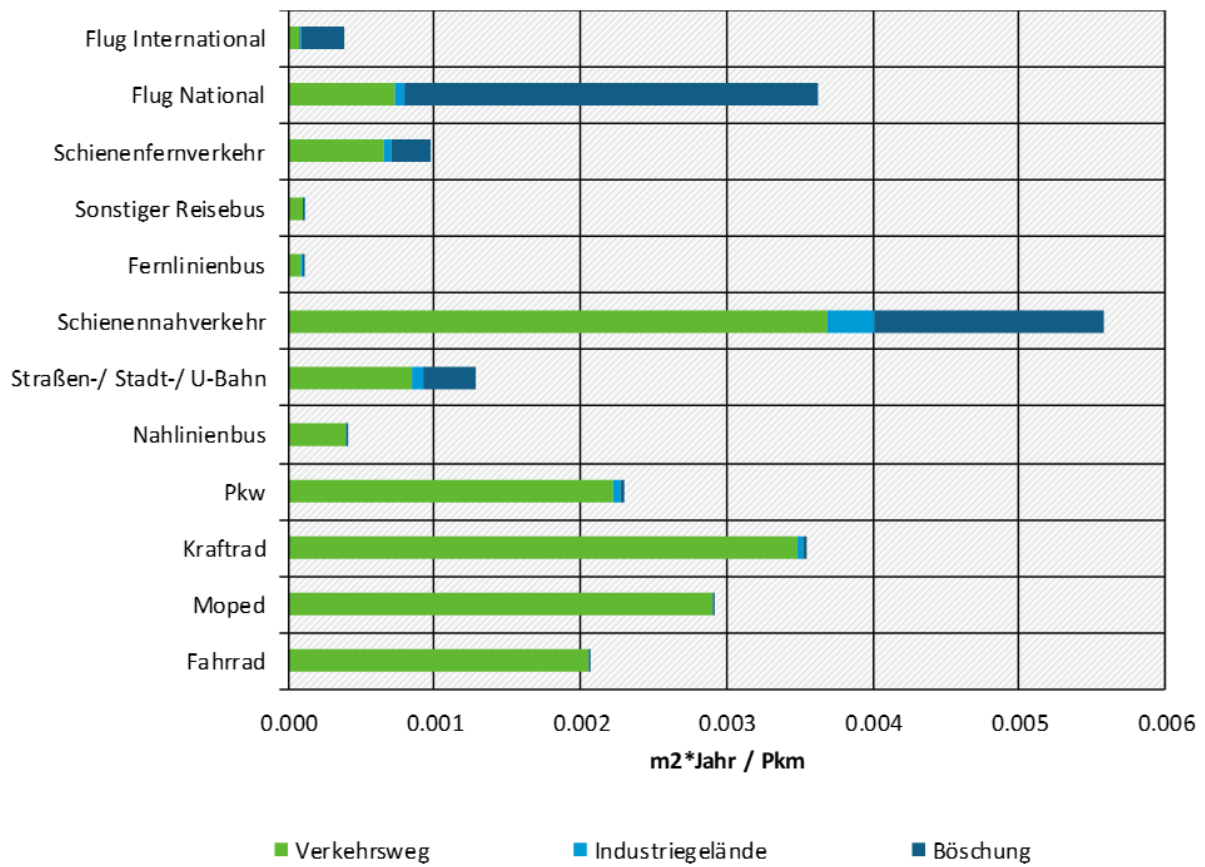
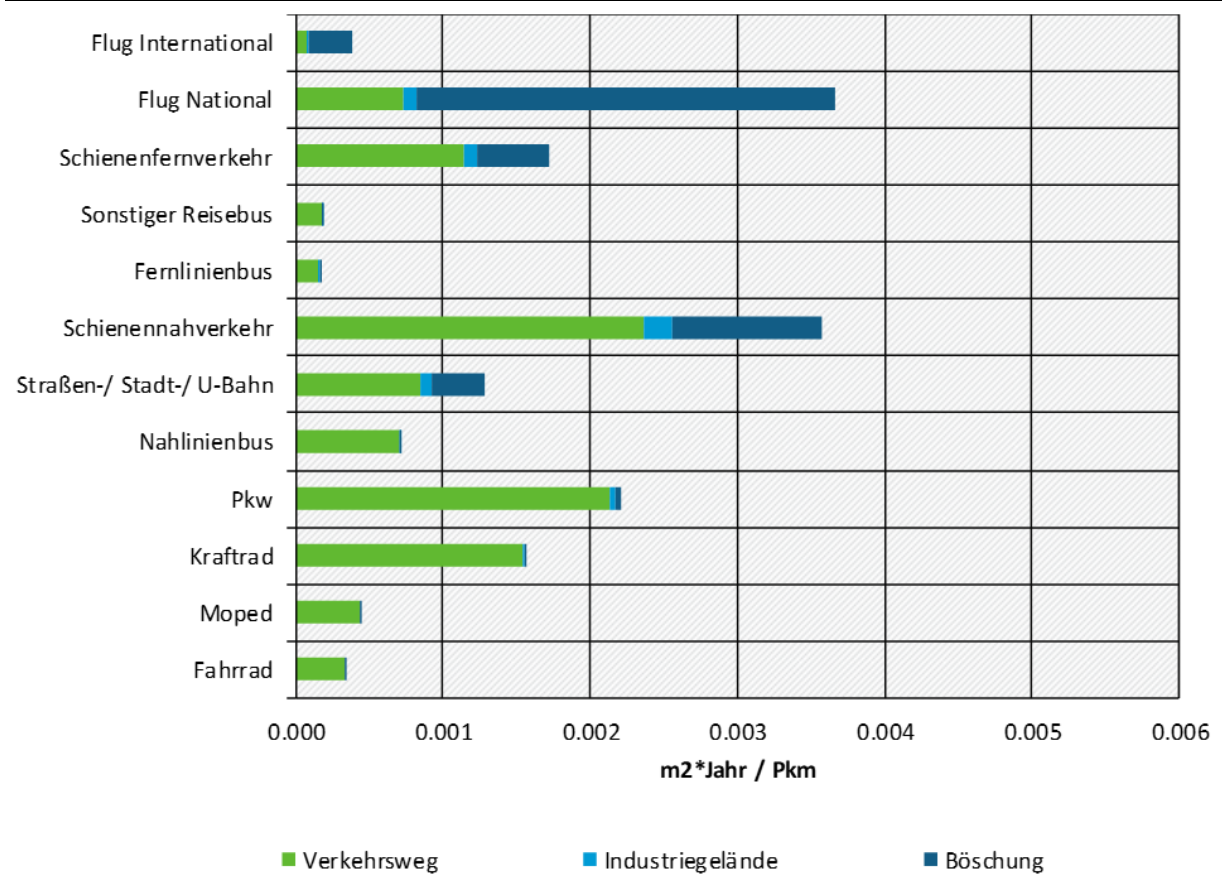


Abbildung 26: Durchschnittliche Flächenbelegung im Personenverkehr in Deutschland 2017, Variante B (Allokation nach Standfläche und Fahrleistung)



Die vorstehenden Abbildungen zeigen den Verkehrsträgervergleich gemittelt über Nah- und Fernverkehre. Dies kann allerdings ein schiefes Bild ergeben, denn Radfahrer bewegen sich nur im Nahverkehr, während z. B. Flugverkehr nur im Fernverkehr zum Tragen kommt. Aus diesem Grunde zeigen die nachstehenden Abbildungen im Vergleich nur die Verkehrsträger auf denjenigen Verkehrswege-Kategorien, die im Nah- bzw. im Fernverkehr besonders relevant sind (für den Personenverkehr). Für die Interpretation ist allerdings zu beachten, dass praktisch jeder Strecke, die im Fernverkehr zurückgelegt wird, je eine Strecke im Nahverkehr vor- und nachgeschaltet ist.

Abbildung 27: Durchschnittliche Flächenbelegung im Personennahverkehr in Deutschland 2017, Variante A (Allokation nach temporärer Flächenbelegung und Fahrleistung)

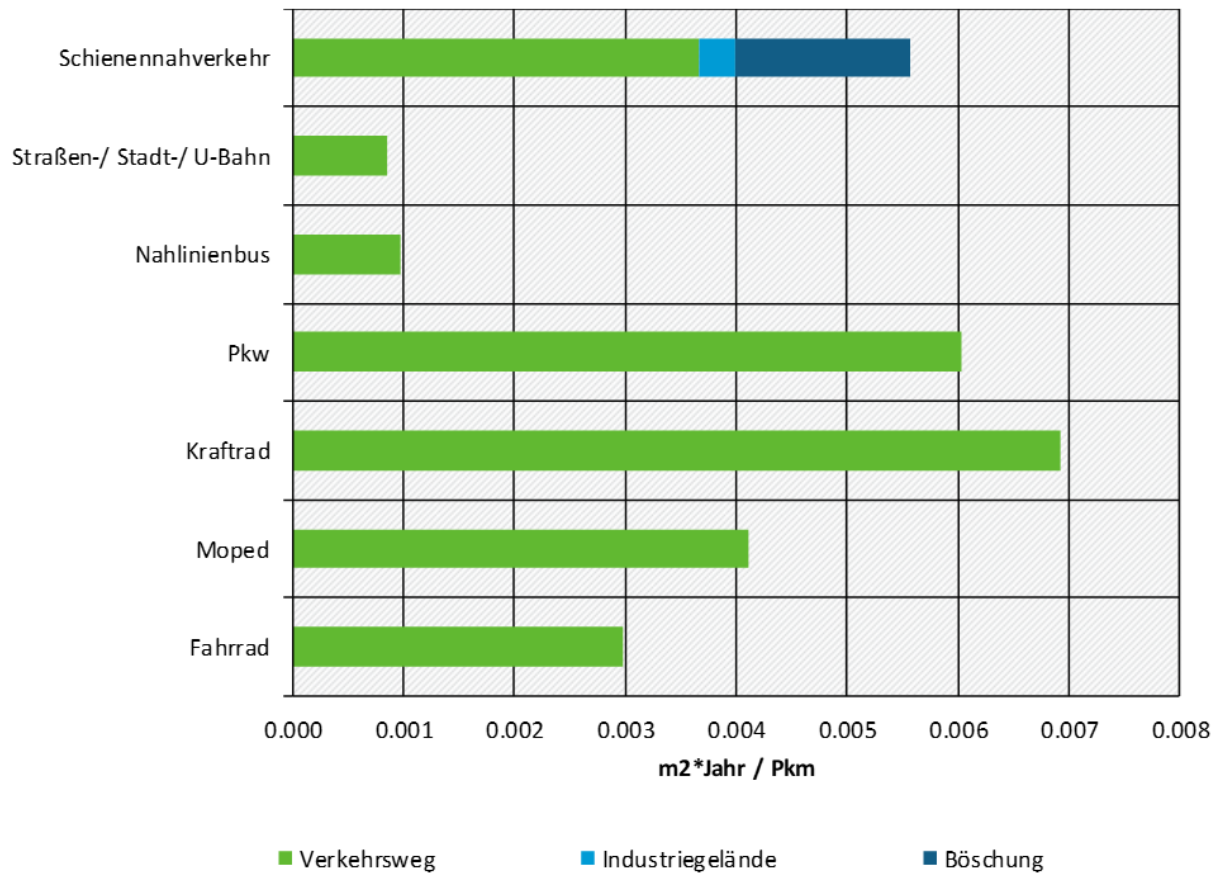
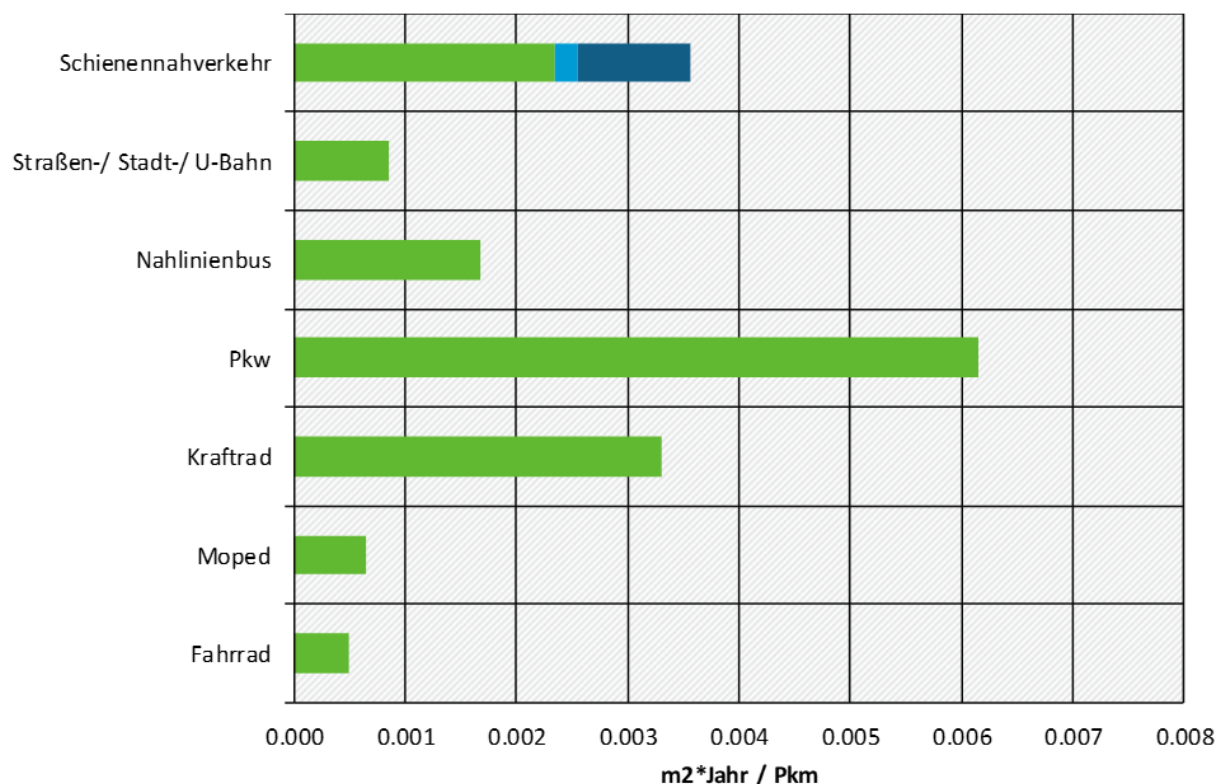


Abbildung 28: Durchschnittliche Flächenbelegung im Personennahverkehr in Deutschland 2017, Variante B (Allokation nach Standfläche und Fahrleistung)



Es ist zu sehen, dass bei diesem Vergleich bei der **Allokationsvariante A** (nach temporärer Flächenbelegung und Fahrleistung) die Schiene sowohl im Nah- als auch im Fernverkehr in etwa gleichauf liegt mit Pkw und Kraftrad auf der Straße. Hingegen scheint der Schienenpersonennahverkehr im Mittelwert über alle gegenüber den meisten anderen Verkehrsträgern sehr schlecht abzuschneiden, während der Schienenpersonen-Fernverkehr (vgl. folgende beiden Abbildungen) etwa gleich gut abschneidet wie der „mittlere Straßenverkehr“ mit Pkw oder Kraftrad. Nach Bussen sowie U- und S-Bahnen bleiben zu Fuß gehen und Rad fahren im Nahverkehr günstige Alternativen im Vergleich zum Pkw.

Bei der **Allokationsvariante B** (nach Standfläche des Fahrzeugs und Fahrleistung) sieht das Ergebnis etwas anders aus: Insbesondere der Schienennahverkehr sowie die Zweiräder (v.a. Fahrrad und Moped, aber auch Motorrad) schneiden bei dieser Allokationsmethode deutlich besser ab. Dafür liegt der Schienenfernverkehr bei der Allokation B erheblich höher

Es ist allerdings zu erwähnen, dass die Art der Flächenbelegung unterschiedlich ist: Die eigentlichen Verkehrswege und die dazugehörten Industrieflächen sind keine natürlichen Flächen bzw. Ökosysteme mehr. Dagegen weisen Böschungen bzw. Verkehrsgrünflächen (z. B. entlang Bahnlinien oder auf Flugplätzen) eine andere, höhere ökologische Qualität auf.

Abbildung 29: Durchschnittliche Flächenbelegung im Personenfernverkehr in Deutschland 2017, Variante A (Allokation nach temporärer Flächenbelegung und Fahrleistung)

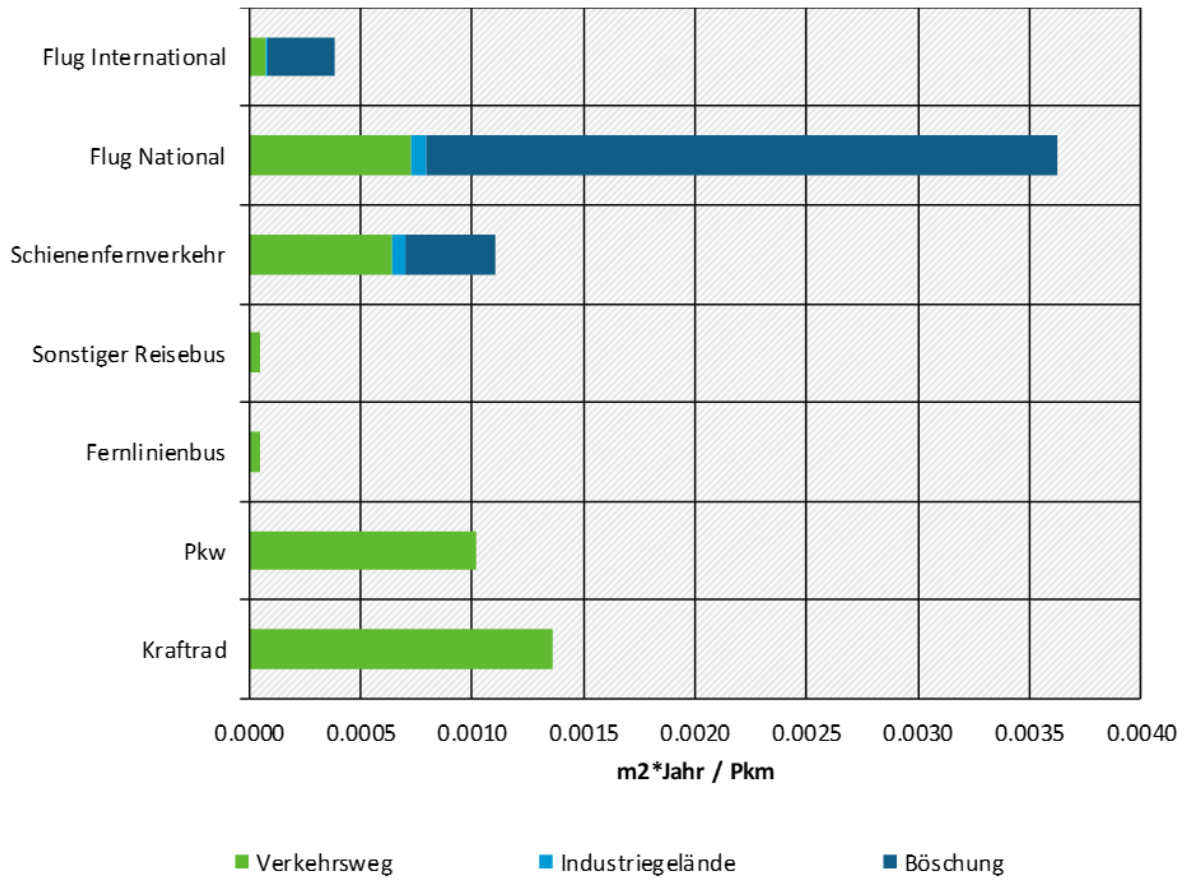
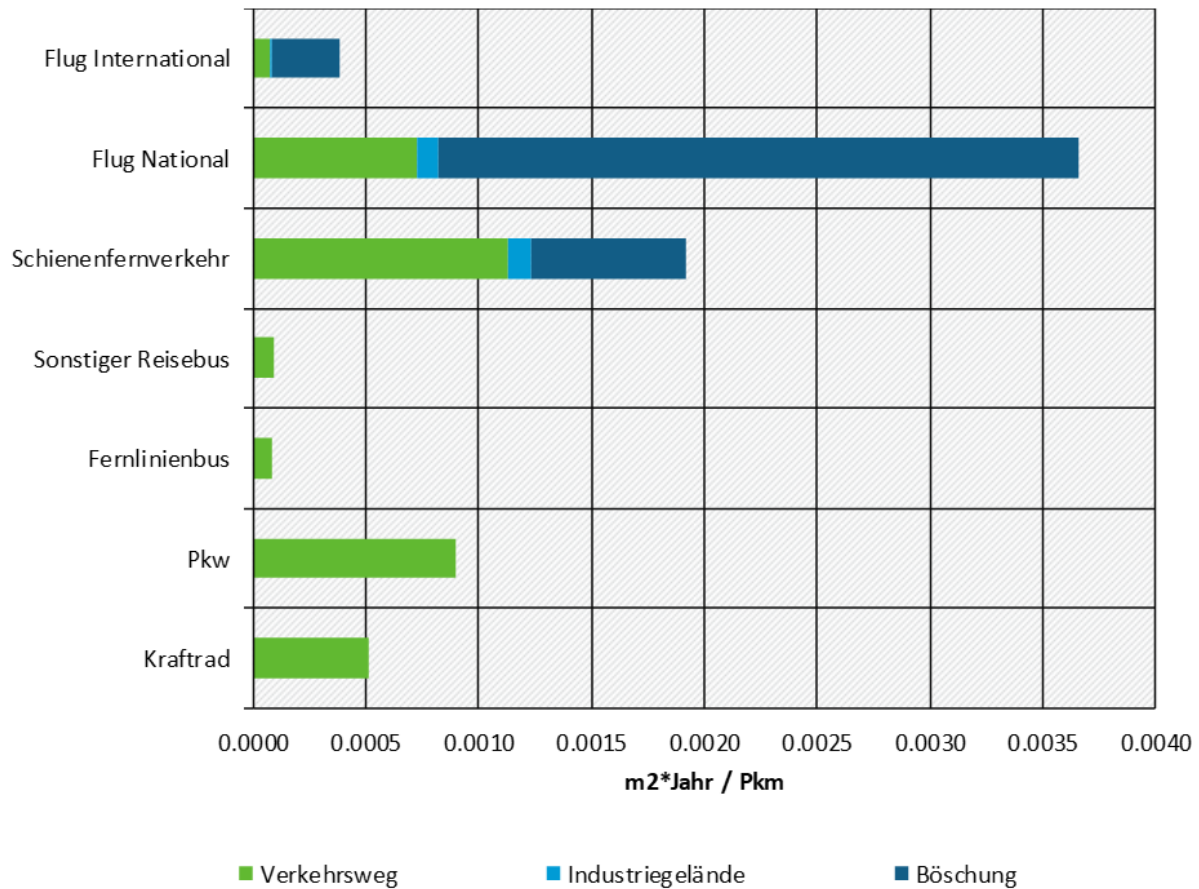


Abbildung 30: Durchschnittliche Flächenbelegung im Personenfernverkehr in Deutschland 2017, Variante B (Allokation nach Standfläche und Fahrleistung)



Eine Betrachtung über alle Entfernungskategorien erscheint beim Personenverkehr insgesamt wenig geeignet, die Stärken und Schwächen der einzelnen Verkehrsträger adäquat widerzugeben. Eine Unterscheidung der Betrachtungsräume (siehe Tabelle 5 und Tabelle 6 in Kapitel 2.2.4) und gegebenenfalls von Wegekettten ist dazu angezeigt.

Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen die durchschnittliche Flächenbelegung für den Güterverkehr in Deutschland.

Abbildung 31: Durchschnittliche Flächenbelegung im Güterverkehr in Deutschland 2017, Variante A (Allokation nach temporärer Flächenbelegung und Fahrleistung)

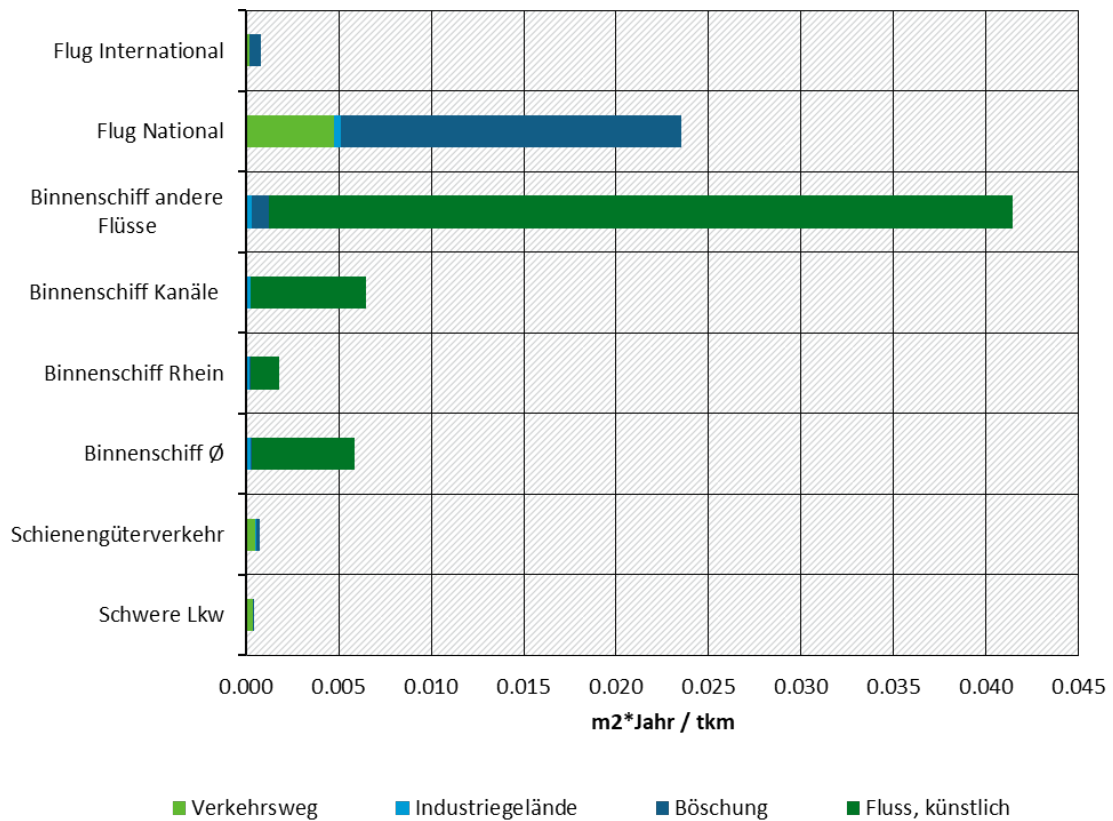
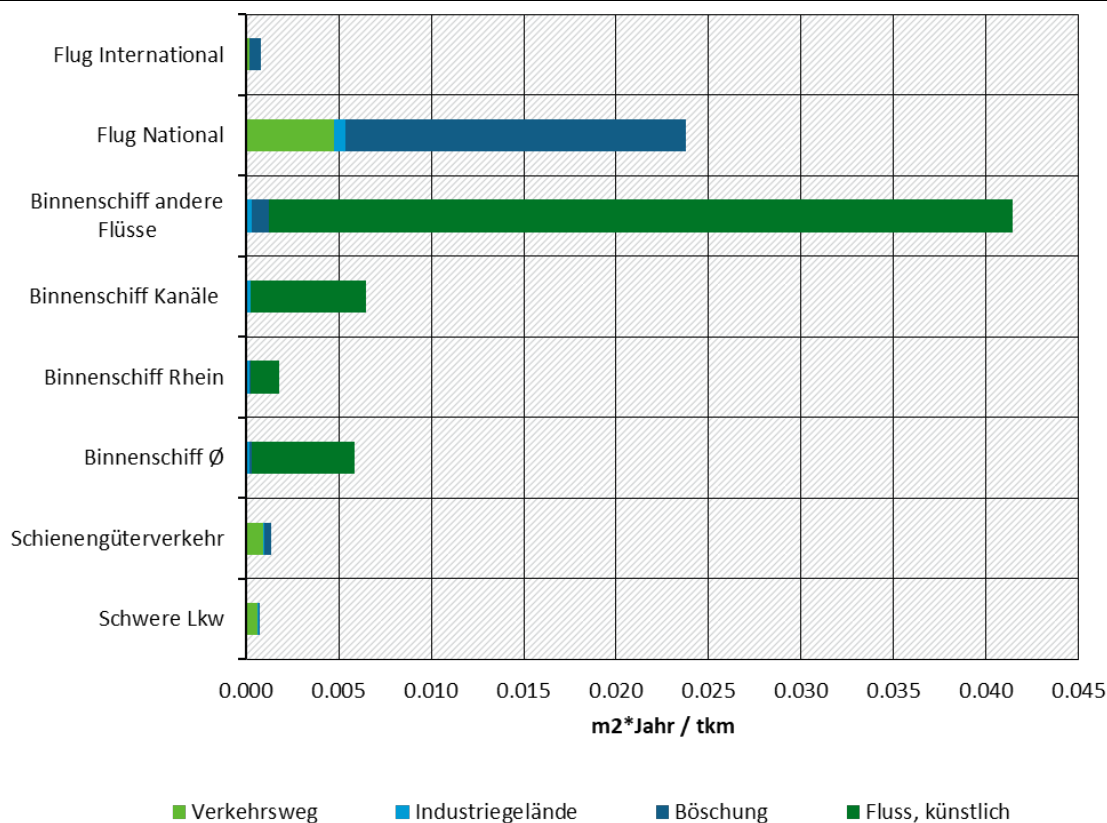


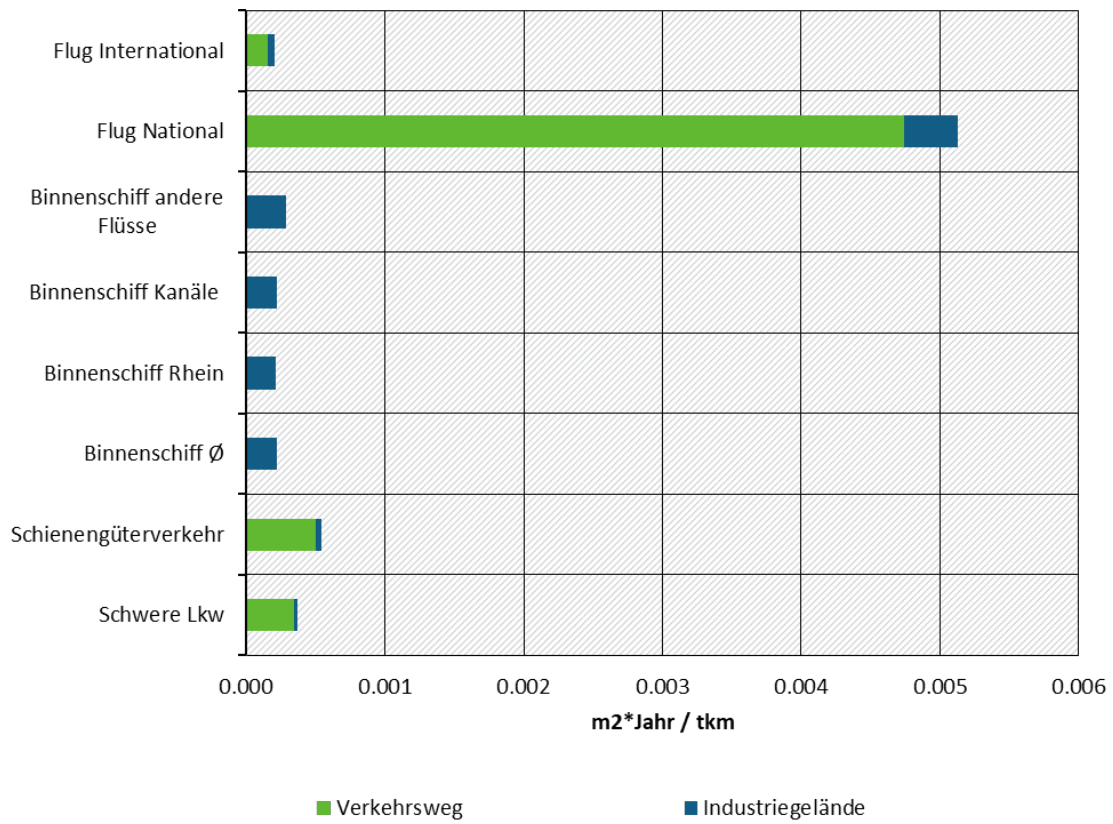
Abbildung 32: Durchschnittliche Flächenbelegung im Güterverkehr in Deutschland 2017, Variante B (Allokation nach Standfläche und Fahrleistung)



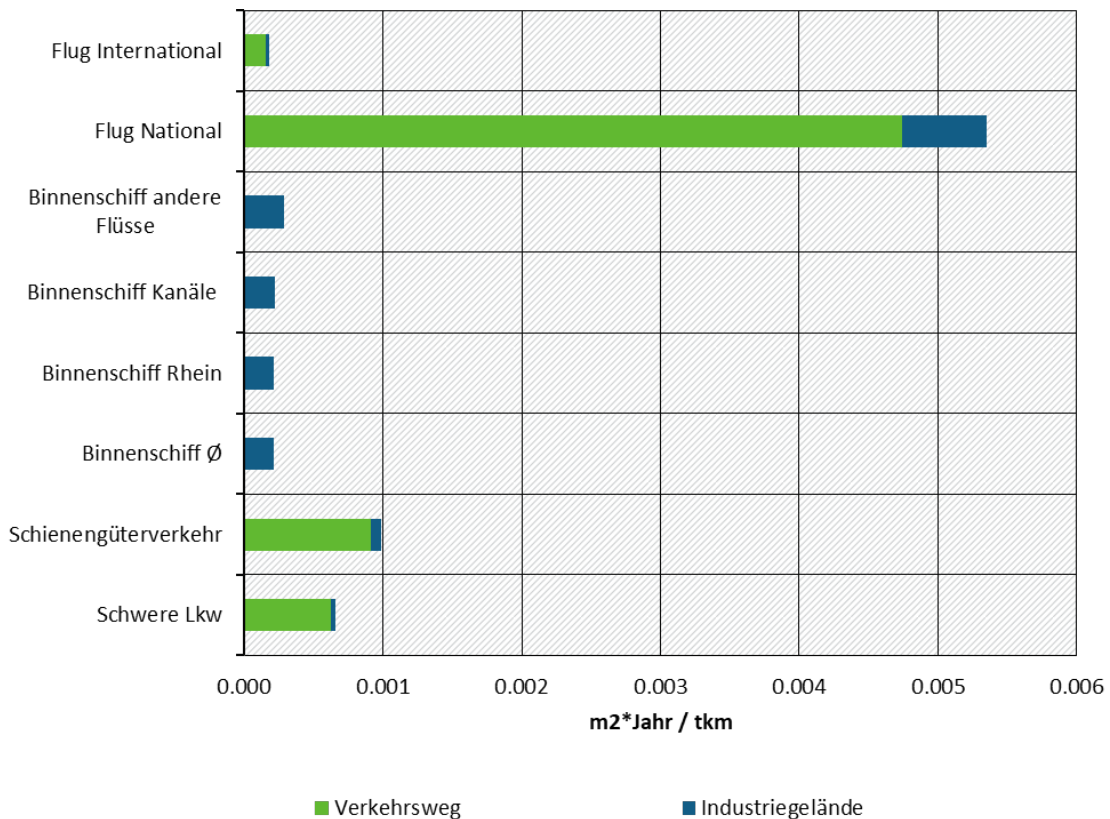
Beim Güterverkehr wird deutlich, dass die Binnenschiffe beim gesamten Flächenbedarf am höchsten liegen, wenn die (durch Aufstauen, Abbaggern oder andere Maßnahmen meist künstlich vertieften) Fahrrinnen der Flüsse selbst auch mitgezählt werden. Betrachtet man dagegen nur die (zumindest größtenteils) versiegelten Landflächen (Landverkehrsweg und Industriegelände) ohne die Kanäle, liegen die Binnenschiffe im Mittel am tiefsten, gefolgt von den schweren Nutzfahrzeugen, während der nationale Güterluftverkehr am höchsten liegt (vgl. Abbildung 33 und Abbildung 34).

Eine Status-quo-Betrachtung ist nur bedingt geeignet, um Handlungsoptionen zu bewerten. Wenn die bewertete Option praktisch keine Auswirkung auf das gesamte System hat, kann davon ausgegangen werden, dass die Betrachtung der typischen Nutzung eine vernünftige Beurteilung erlaubt. Geht es hingegen um Optionen, die zu merklichen Veränderungen des Gesamtsystems führen, sollten diese mit einer systemischen Betrachtung beurteilt werden.

**Abbildung 33: Durchschnittliche Flächenbelegung im Güterverkehr in Deutschland 2017, ohne Grünflächen/Böschungen und Flüsse
Variante A (Allokation nach temporärer Flächenbelegung und Fahrleistung)**



**Abbildung 34: Durchschnittliche Flächenbelegung im Güterverkehr in Deutschland 2017, ohne Grünflächen/Böschungen und Flüsse
Variante B (Allokation nach Fahrleistung)**

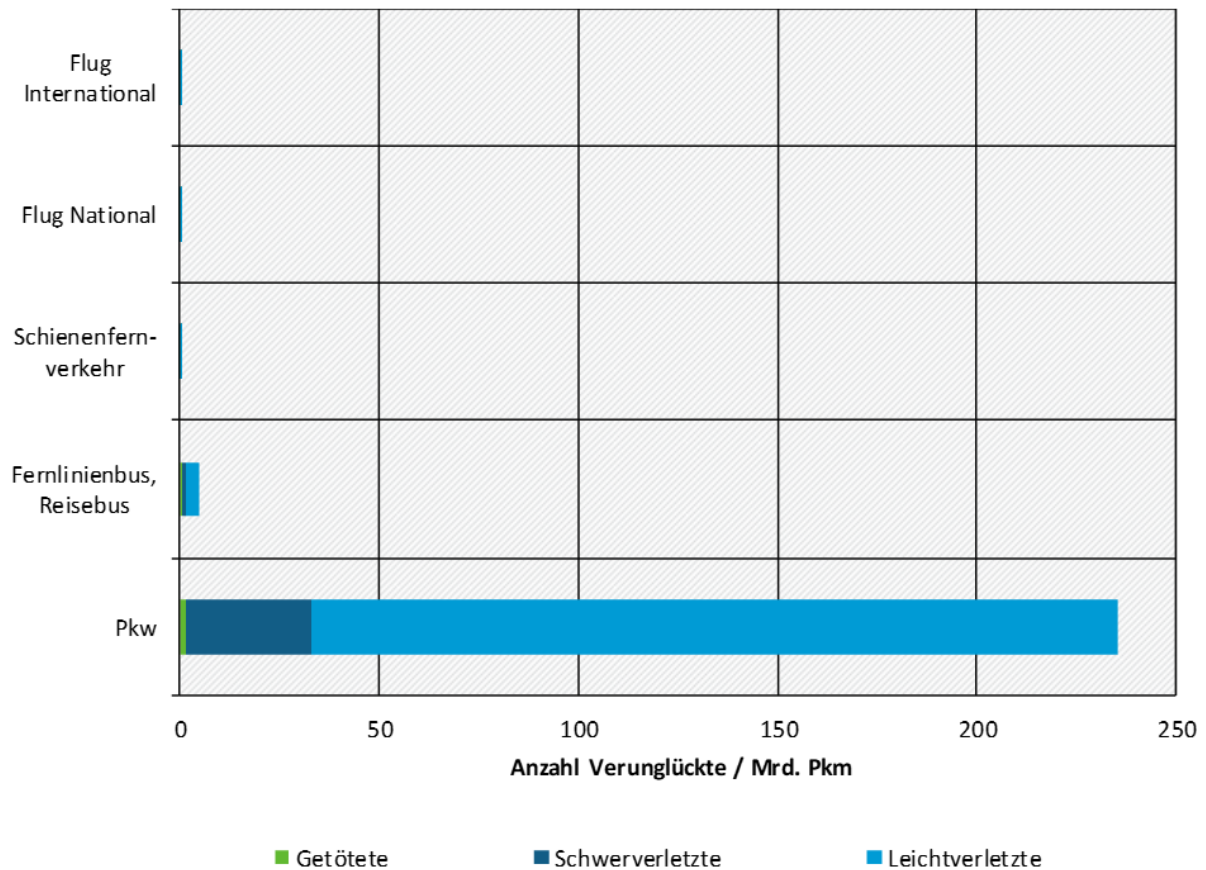


4.2.4 Unfälle

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse zu den Unfällen. Dargestellt sind die Unfallraten, in Anzahl verunglückter Personen (Verletzte und Getötete) pro Mrd. Personen- bzw. Tonnenkilometer. Sämtliche Ergebnisse basieren auf den Unfallzahlen sowie Verunglücktenzahlen nach Betroffenheit durch Unfälle (d. h. gemäß Monitoringprinzip), weil die statistisch verfügbaren Unfalldaten nur nach Betroffenheit umfassend vorliegen, nicht aber nach Verursacher. Bei den meisten Verkehrsarten würden sich die Ergebnisse nach Verursacher- und Betroffenheitsprinzip nicht sehr stark unterscheiden. Beim Fahrrad- und Fußverkehr dagegen sind die Unterschiede massiv, weil sie als ‚schwächere‘ und weniger gut geschützte Verkehrsarten überproportional stark von Unfällen betroffen sind. Aus diesem Grund zeigen die Unfallkosten je Verkehrsarten insbesondere beim nicht-motorisierten Verkehr primär ein Bild der Betroffenheit, und weniger der Verursacher.

Die Abbildung 38 zeigt die Unfallraten im Personenfernverkehr. Im Flugverkehr und im Schienenfernverkehr liegen die Unfallraten so tief, dass sie in der Abbildung nicht sichtbar sind (nationaler Luftverkehr und Schienenfernverkehr: ca. 0,4 Verunglückte pro Mrd. Pkm, internationaler Luftverkehr ca. 0,1 Verunglückte pro Mrd. Pkm. Im Fernlinien- bzw. Reisebusverkehr liegen die Unfallraten gut zehnmal höher, bei fünf Verunglückten pro Mrd. Pkm. Die Pkw wiederum weisen nochmals erheblich höhere Verunglücktenzahlen auf (gut 230 Verunglückte pro Mrd. Pkm).

Abbildung 35: Unfälle im Personenfernverkehr in Deutschland 2017

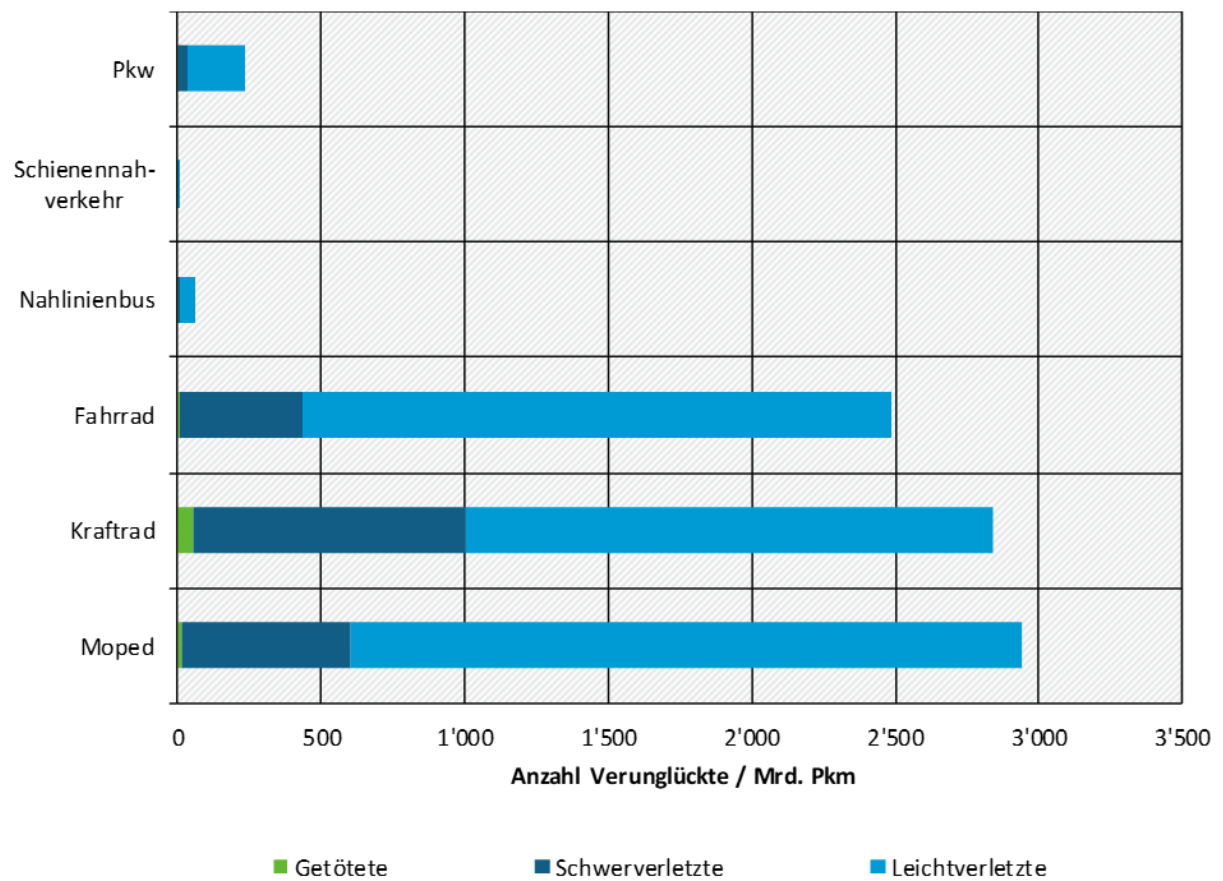


Quelle: eigene Berechnungen. Für die Verkehrsarten mit sehr geringen Unfallraten (Schiene, Luft) wurde ein Mittelwert der Unfallzahlen der letzten 10 Jahre verwendet.

Die Abbildung 36 zeigt die Zahl der Verunglückten je Milliarde Personenkilometer für den Personennahverkehr. Der Schienennahverkehr weist klar das geringste Unfallrisiko auf (1,5 Verunglückte pro Mrd. Pkm), gefolgt von den Nahlinienbussen (knapp 60 Verunglückte pro Mrd. Pkm) und den Pkw. Die Zweiräder dagegen weisen massiv höhere Unfallraten auf. Im Fahrradverkehr verunglücken etwa 2.500 Personen pro Milliarde Personenkilometer, bei den Mopeds und Krafrädern sogar rund 2.900 Personen pro Mrd. Pkm. Die hohen Unfallraten bei den Zweirädern sind insbesondere eine Folge derer hohen Betroffenheit durch mangelnden Schutz. Bei den Fahrrädern führen Unsicherheiten in Bezug auf das absolute Niveau der Verkehrsleistung zudem zu einer größeren Unsicherheit bei den spezifischen Unfallraten bzw. Verunfalltenraten.

Achtung: Auch bei den Pkw, im Schienennahverkehr, den Nahlinienbusse sowie dem Fahrrad gibt es Getötete. Die entsprechenden Raten tödlich verunglückter Personen liegen aber so tief, dass sie in der Abbildung nicht sichtbar sind.

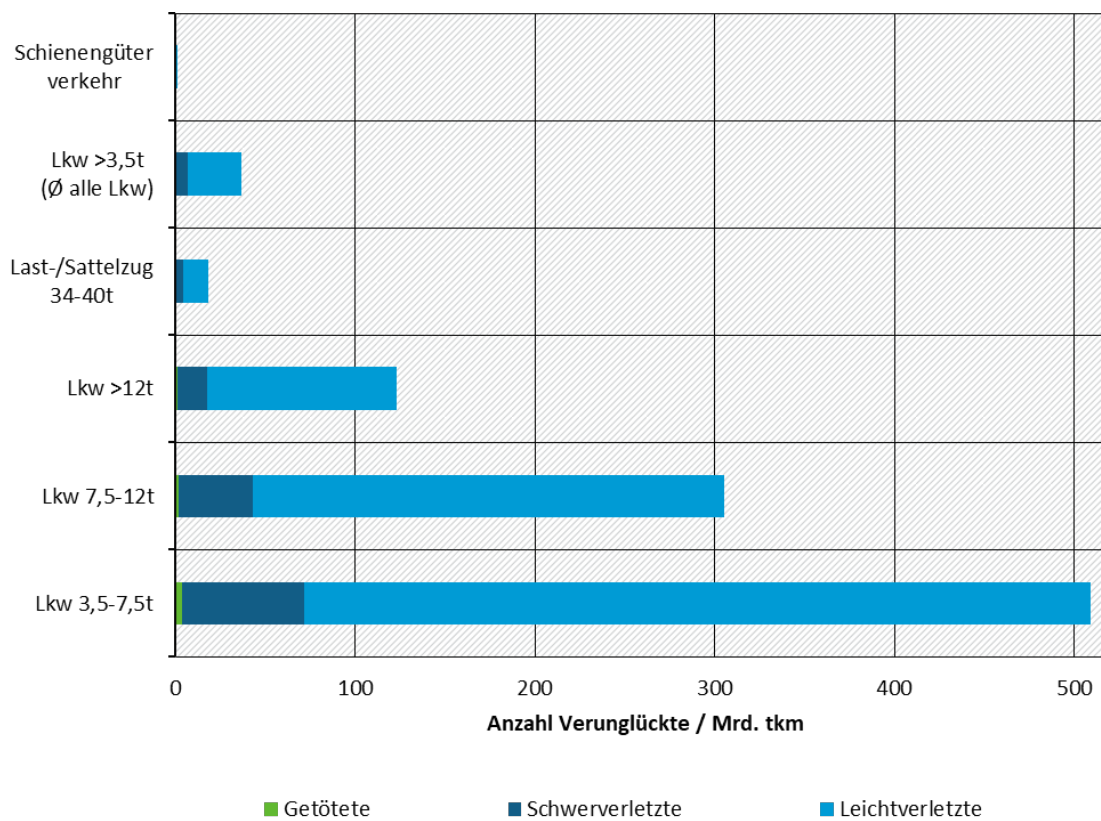
Abbildung 36: Unfälle im Personennahverkehr in Deutschland 2017



Quelle: eigene Berechnungen. Für die Verkehrsarten mit sehr geringen Unfallraten (Schiene, Luft) wurde ein Mittelwert der Unfallzahlen der letzten 10 Jahre verwendet.

Die Abbildung 37 zeigt die Unfallraten im Güterverkehr in Deutschland. Im Schienengüterverkehr sind die Unfallraten sehr klein, bei den Lkw steigen die spezifischen Verunfalltenzahlen pro Tonnenkilometer in Abhängigkeit von der Lkw-Größe an.

Abbildung 37: Unfälle im Güterverkehr in Deutschland 2017



Quelle: eigene Berechnungen. Für die Verkehrsarten mit sehr geringen Unfallraten (Schiene, Luft) wurde ein Mittelwert der Unfallzahlen der letzten 10 Jahre verwendet.

4.2.5 Umweltkosten

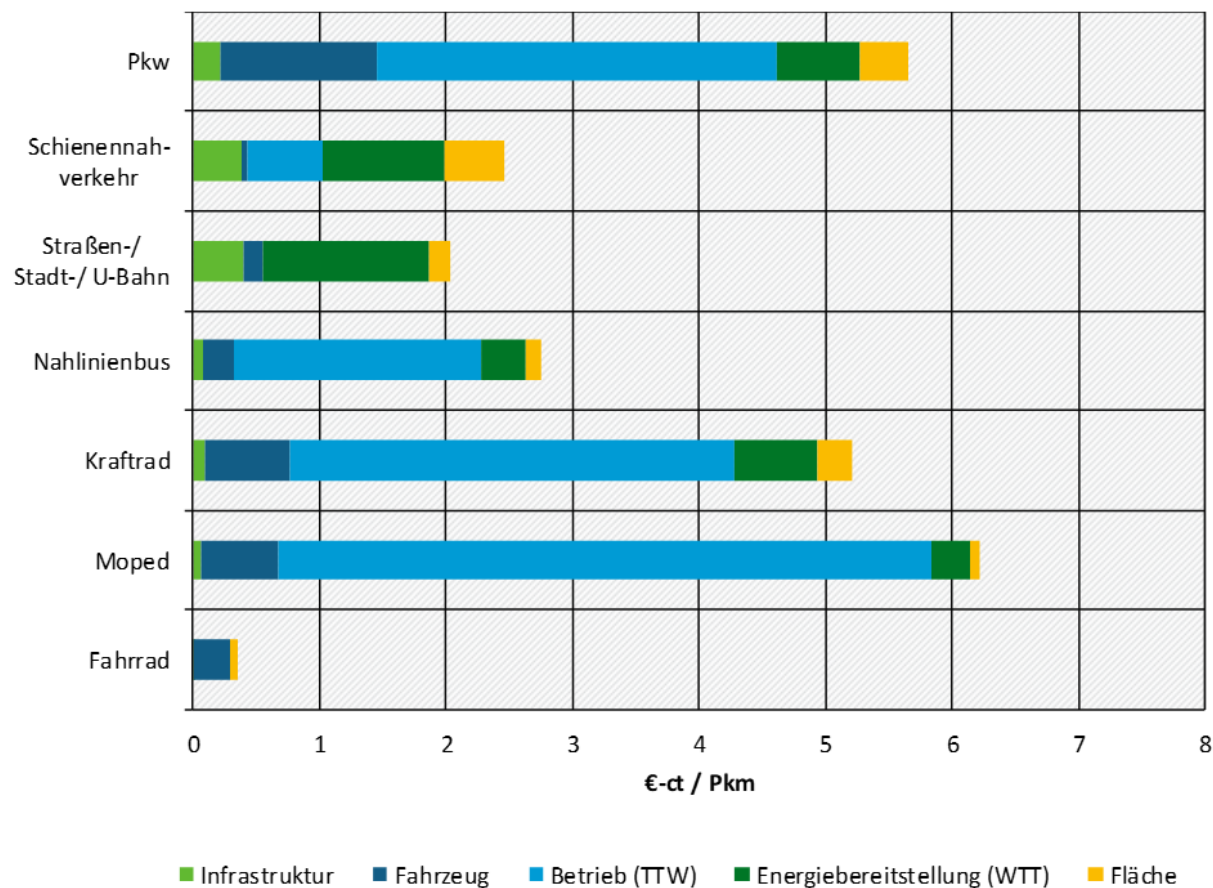
In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Berechnungen der Umweltkosten dargestellt. Die Darstellungen umfassen jeweils die Kosten infolge Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb (TTW), der Energiebereitstellung (WTT), sowie Herstellung und Unterhalt von Fahrzeugen und Infrastruktur. Zusätzlich enthalten sind die Umweltkosten infolge des Flächenverbrauchs, der zu Verlusten und Zerschneidung von natürlichen Habitaten bzw. Ökosystemen führt. Nicht abgedeckt sind die Lärmkosten (vgl. dazu Kap. 2.5.3). Die Monetarisierung basiert auf den Umweltbelastungsdaten der vorherigen Kapitel (4.2.1: Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen, 4.2.3 Fläche¹²) und den im Methodenkapitel (Kap. 2.5) beschriebenen Monetarisierungsansätzen. Das Vorgehen stützt sich zum größten Teil auf die Methodenkonvention 3.0 des UBA (Umweltbundesamt, 2019a).

Die Abbildung 38 zeigt die Umweltkosten des Personennahverkehrs in Deutschland, dargestellt in €-Cent pro Personenkilometer (€-ct/Pkm). Die höchsten Umweltkosten weisen der Pkw sowie die motorisierten Zweiräder auf, ihre Umweltkosten liegen im Bereich 5-6 €-ct pro Personenkilometer. Etwa halb so hoch sind die Umweltkosten im öffentlichen Nahverkehr: der

¹² Für die Umweltkosten durch Flächenbedarf werden lediglich die verbauten Flächen berücksichtigt, d. h. die Verkehrswege und dazugehörigen Gebäude/Industrieflächen, nicht aber angrenzende Böschungen und Grünflächen (z. B. entlang Bahninfrastrukturen, Straßen oder auf Flugplätzen). Für den Flächenbedarf werden die Resultate gemäß Allokationsvariante B (nach Fahrleistung) verwendet (vgl. Kap. 4.2.3).

städtische Schienenverkehr (Straßen-, Stadt- und U-Bahnen) verursacht Umweltkosten von rund 2 €-ct pro Pkm, der Schienennahverkehr knapp 2,5 €-ct/Pkm und der Nahlinienbus 2,75 €-ct/Pkm. Die klar tiefsten Umweltkosten verursacht der nicht-motorisierte Fahrradverkehr, bei dem lediglich die Herstellung von Fahrzeug, Infrastruktur und Flächenbedarf relevant sind.

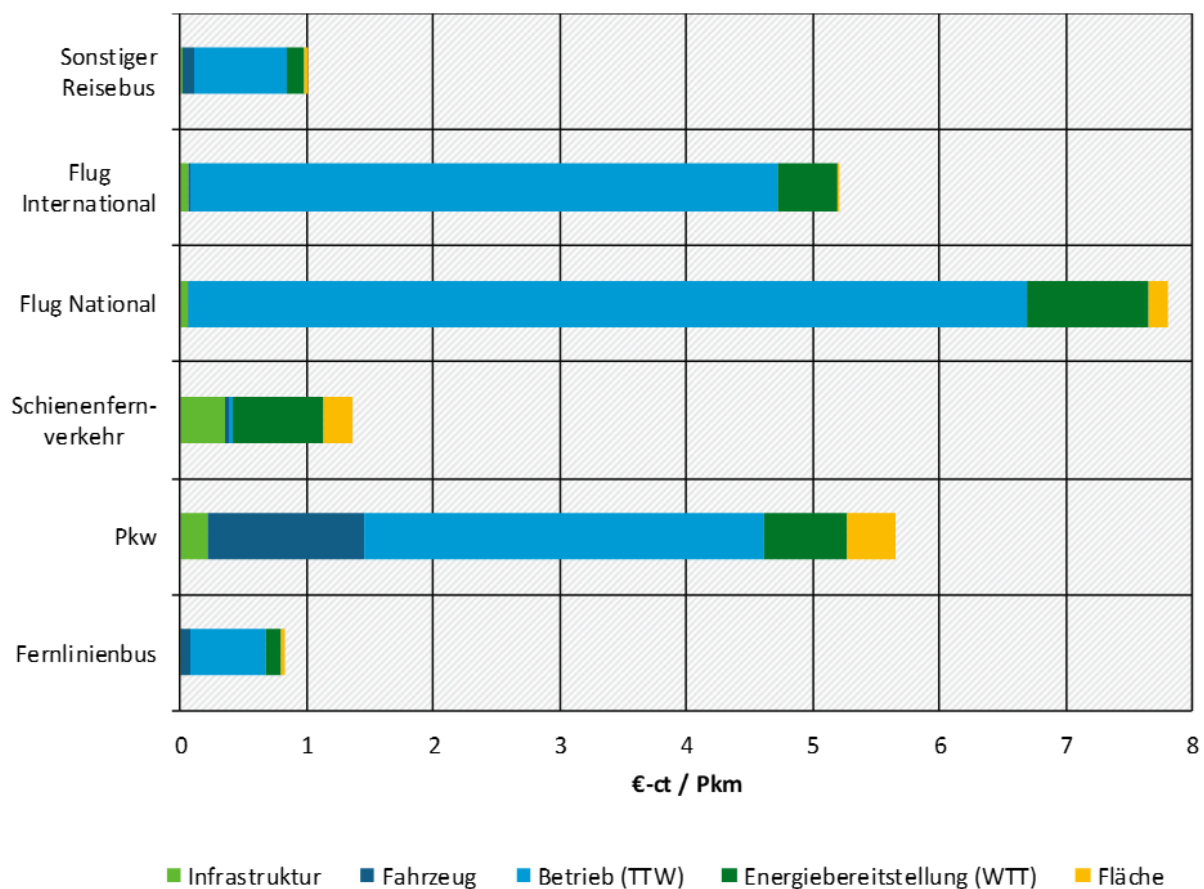
Abbildung 38: Umweltkosten des Personennahverkehrs in Deutschland 2017



Quelle: eigene Berechnungen

Die Umweltkosten des Personenfernverkehrs in Deutschland sind in der folgenden Abbildung 39 dargestellt. Die höchsten Umweltkosten werden im nationalen Flugverkehr verursacht (knapp 8 €-ct/Pkm), gefolgt vom Pkw und dem internationalen Flugverkehr, deren Umweltkosten zwischen 5 und 6 €-ct pro Personenkilometer betragen. Deutlich geringer sind die Umweltkosten des Schienenfernverkehrs (knapp 1,4 €-ct pro Pkm) sowie den Reise- und Fernlinienbussen (gut 0,8 bis 1 €-ct/Pkm).

Abbildung 39: Umweltkosten des Personenfernverkehrs in Deutschland 2017

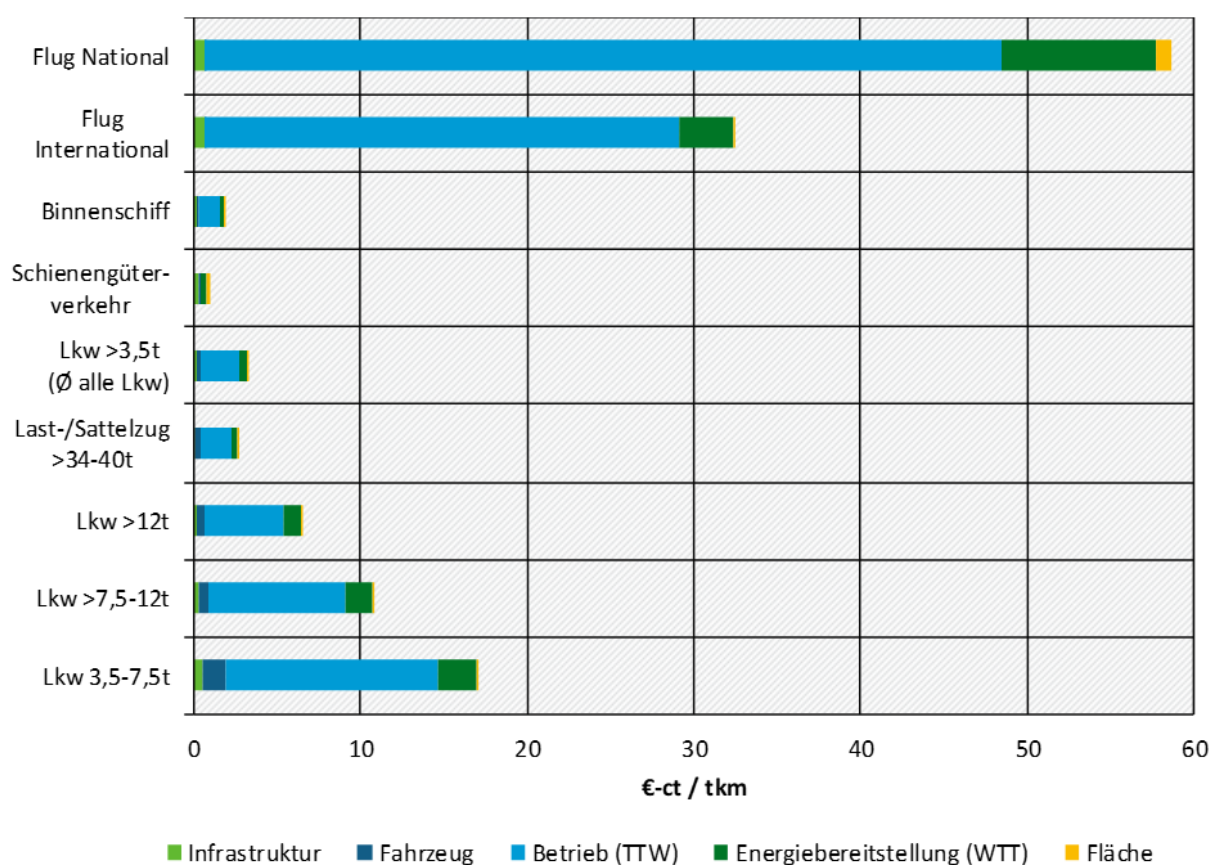


Quelle: eigene Berechnungen

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse für den Güterverkehr – zuerst mit Flugverkehr und dann ohne Flugverkehr, damit die anderen Ergebnisse der anderen Verkehrsarten besser vergleichbar sind.

Die höchsten Umweltkosten pro Tonnenkilometer weist der Luftverkehr auf. Allerdings gilt es zu erwähnen, dass die im Luftverkehr transportierten Güter oft eine hohe Wertigkeit aufweisen. Beim landgebundenen Verkehr weisen der Schienengüterverkehr mit rund 1 €-ct pro Tonnenkilometer und die Binnenschifffahrt mit rund 1,8 €-ct pro tkm die geringsten Umweltkosten aus. Schwere Lastwagen (Last-/Sattelzüge über 34t) mit Umweltkosten von rund 2,8 €-ct/tkm folgen danach. Die Umweltkosten des Durchschnitts aller Lkw betragen 3,4 €-ct/tkm. Je kleiner die Fahrzeuge, desto höher die durchschnittlichen Umweltkosten je Tonnenkilometer. Im Güternahverkehr sind die Umweltkosten pro Kilometer folglich höher als im Güterfernverkehr.

Abbildung 40: Umweltkosten des Güterverkehrs in Deutschland 2017



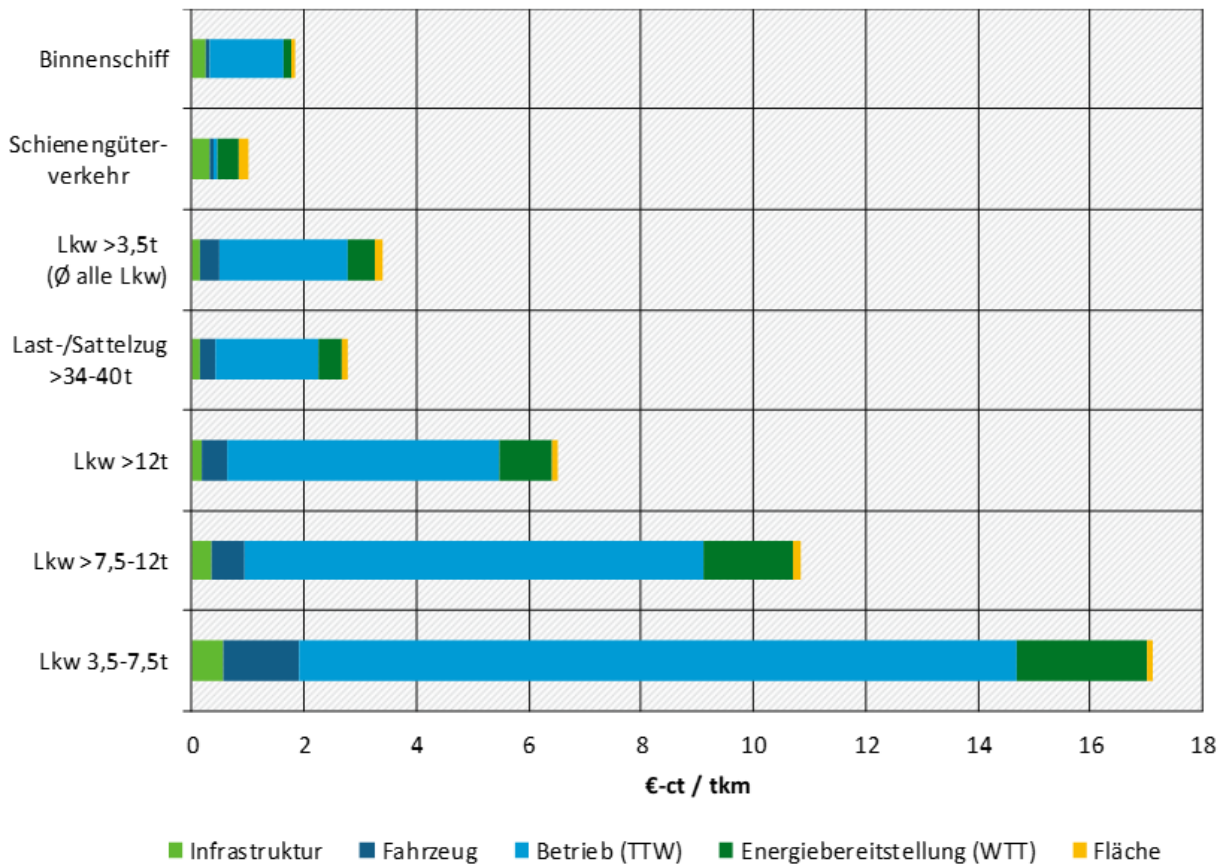
Quelle: eigene Berechnungen

Die ermittelten Resultate der Umweltkosten sind sehr ähnlich wie die Ergebnisse der Methodenkonvention 3.0 (Umweltbundesamt, 2019a). Weil das methodische Vorgehen und insbesondere die Monetarisierung im vorliegenden Vorhaben direkt auf die Methodenkonvention 3.0 abstützt, liegen die Unterschiede vor allem darin, dass im vorliegenden Vorhaben das Mengengerüst (Emissionen) umfassend aktualisiert bzw. teilweise neu ermittelt wurde:

- ▶ Emissionen aus Betrieb (TTW) und Energiebereitstellung (WTT): Das vorliegende Vorhaben stützt sich auf die aktualisierten Emissionsdaten von TREMOD ab, die im Straßenverkehr auf der neusten HBEFA-Version 4.1 basieren, während die Methodenkonvention 3.0 auf HBEFA 3.3 basiert. Die Unterschiede sind allerdings eher gering.
- ▶ Emissionen der Fahrzeuge und Infrastruktur (Herstellung und Unterhalt) sowie Flächenbedarf: Diese Daten sind im vorliegenden Vorhaben umfassend neu ermittelt worden. Entsprechend weichen hier die Resultate etwas stärker ab von den Ergebnissen der Methodenkonvention 3.0.

Insgesamt sind die Gesamtaussagen zu den Umweltkosten der verschiedenen Verkehrsarten jedoch sehr ähnlich wie in der Methodenkonvention 3.0. Gewisse Verschiebungen gibt es einzig bei den Fahrzeugen und der Infrastruktur.

Abbildung 41: Umweltkosten des Güterverkehrs in Deutschland 2017 (Darstellung ohne Luftverkehr)



Quelle: eigene Berechnungen

Exkurs Unfallkosten

Im Rahmen des Vorhabens wurden neben den Umweltkosten auch die externen Unfallkosten berechnet. Grundsätzlich ist die Methodik zur Berechnung der Unfallkosten international gleichermaßen etabliert (vgl. u. a. (DG MOVE, 2019)). Allerdings wird an dieser Stelle darauf verzichtet, die Unfallkosten und die Umweltkosten zu addieren. Der Grund liegt darin, dass die Unfalldaten nur nach Betroffenheit vorliegen und nicht nach Verursacher. Bei vielen Verkehrsarten würden sich die Ergebnisse nach Verursacher- und Betroffenheitsprinzip nicht sehr stark unterscheiden. Beim Fahrrad- und Fußverkehr dagegen sind die Unterschiede massiv, weil sie als ‚schwächere‘ und weniger gut geschützte Verkehrsarten überproportional stark von Unfällen betroffen sind. Aus diesem Grund zeigen die Unfallkosten je Verkehrsarten insbesondere beim nicht-motorisierten Verkehr primär ein Bild der Betroffenheit, und weniger der Verursacher.

Die folgende Tabelle zeigt die spezifischen Unfallkosten in €-ct pro Personenkilometer (für den Personenverkehr) bzw. pro Tonnenkilometer (für den Güterverkehr).

Die Ergebnisse widerspiegeln im Wesentlichen die Ergebnisse der spezifischen Unfallzahlen, wie sie im Kapitel 4.2.4 beschrieben sind. Die klar höchsten Unfallkosten weisen die Zweiräder auf, was insbesondere ihrer hohen Betroffenheit durch mangelnden Schutz zuzuschreiben ist. Bei den Fahrrädern ist die Unsicherheit zusätzlich erheblich, weil die Verkehrsleistung mit

Unsicherheiten behaftet ist. Außerhalb des Zweiradverkehrs sind die Unfallkosten im Straßenverkehr am höchsten, insbesondere bei den Pkw (gut 5 €-ct pro Pkm). Die Unfallkosten bei den Bussen (Nah- oder Fernlinienbusse) liegen um den Faktor 10 tiefer als bei den Pkw. Nochmals um den Faktor 10 und mehr tiefer liegen die Unfallkosten im Schienen- und Flugverkehr.

Tabelle 20: Unfallkosten Personenverkehr in Deutschland (2017), in €-ct pro Pkm bzw. tkm

Verkehrsmittel	Personenverkehr €-ct/Pkm	Güterverkehr €-ct/tkm
Pkw	5,1	-
Schienenahverkehr	0,033	-
Nahlinienbus	0,54	-
Fahrrad	35,6	-
Kraftrad	44,9	-
Moped	26,3	-
Fernlinienbus, Reisebus	0,51	-
Schienenfernverkehr	0,009	-
Flug National	0,040	-
Flug International	0,027	-
Lkw >3,5t (Ø alle Lkw)	-	0,59
Last-/Sattelzug 34-40t	-	0,36
Lkw >12t	-	1,64
Lkw 7,5-12t	-	4,0
Lkw 3,5-7,5t	-	6,8
Schienengüterverkehr	-	0,005

Quelle: eigene Berechnungen; Unfallkosten gemäß Betroffenheit bzw. Monitoringprinzip

Vertiefung Lärmkosten

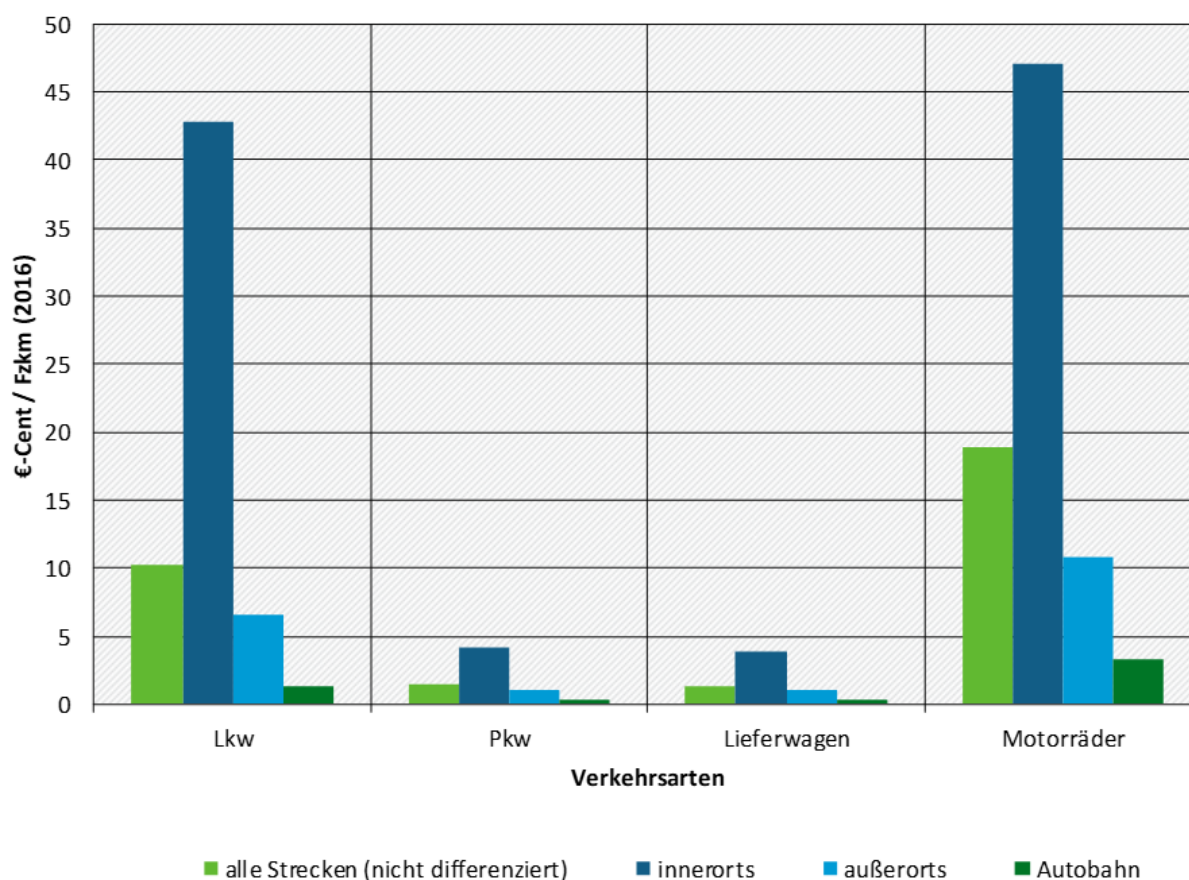
Im Folgenden sind die Ergebnisse der Abschätzung fahrleistungsspezifischer Lärmkostensätze dargestellt, die im Rahmen einer speziellen Vertiefung ermittelt wurden. Das methodische Vorgehen dazu ist im Kapitel 2.5.3 dargestellt. Die Berechnungen sind mittels zwei methodischer Ansätze durchgeführt worden (Hauptmethode sowie alternative Berechnung).

Die folgende Tabelle zeigt die durchschnittlichen Lärmkosten je Fzkm nach der Hauptmethode für die vier Verkehrsarten Lkw, Pkw, Lieferwagen und Motorräder. Dargestellt sind jeweils die Ergebnisse für die drei betrachteten räumlichen Situationen und der undifferenzierte Wert. Die höchsten Durchschnittskosten weisen die Motorräder auf, gefolgt von den Lkw (rund 10 €-ct pro Fzkm im Mittel über alle räumlichen Situationen). Die Pkw und Lieferwagen weisen deutlich niedrigere durchschnittliche Lärmkosten auf (Pkw: ca. 1,5 €-ct pro Fzkm). Die Ergebnisse sind auch in Abbildung 42 dargestellt.

Tabelle 21: Durchschnittliche Lärmkosten je Fzkm gemäß Hauptmethode

räumliche Situation	Lärmkosten: Kostensätze in EUR-Cent ₂₀₁₆ / Fzkm			
	Lkw	Pkw	Lieferwagen	Motorräder
innerorts	42,9	4,1	3,9	47,1
außerorts	6,5	1,1	1,1	10,8
Autobahn	1,3	0,4	0,4	3,4
nicht differenziert	10,2	1,5	1,3	19,0

Abbildung 42: Durchschnittliche Lärmkosten je Fzkm gemäß Hauptmethode



Quellen: Eigene Berechnungen basierend auf (Althaus, 2012), (Doll, 2018a).

Wenn man diese Durchschnittskosten mit den Fahrleistungen (differenziert nach räumlichen Situationen) multipliziert, resultieren Gesamt-Lärmkosten von 20,2 Mrd. EUR pro Jahr (für 2016) für diese vier Verkehrsarten bzw. 20,7 Mrd. EUR pro Jahr für den gesamten Straßenverkehr inkl. der Busse (Reise- und Linienbusse)¹³. Dieser Wert ist eher hoch verglichen mit Ergebnissen aus früheren Studien zu den gesamten Straßenverkehrslärmkosten (z. B. Allianz pro Schiene 2007: 8,7 Mrd. EUR im Jahr 2005 (Schreyer et al., 2007)). Die aktuelle EU-Studie (DG MOVE, 2019) schätzt die Lärmkosten des Straßenverkehrs in Deutschland auf 5,0 Mrd. EUR pro Jahr. Die jüngste Studie zu den externen Kosten des Verkehrs in der Schweiz

¹³ Unter der Annahme, dass die Durchschnittskosten für Busse in etwa gleich groß sind wie bei den Lkw.

(Bieler et al., 2019) weist für den Straßenverkehr in der Schweiz Lärmkosten von 2,0 Mrd. EUR pro Jahr (2015) aus.

Die Tabelle 22 zeigt die Ergebnisse mit den durchschnittlichen Lärmkosten je Fzkm gemäß Alternativmethode. Die Kostensätze sind deutlich niedriger als die gemäß Hauptmethode, um den Faktor 5 bis 10. Auch wenn sich die absoluten Niveaus der beiden Berechnungsmethoden deutlich unterscheiden, sind die Verhältnisse der verschiedenen Verkehrsmittel bei beiden Methoden ähnlich: Die Durchschnittskosten der Lkw (Mittelwert für alle Straßen) sind 7 bis 11 Mal größer als die der Pkw, die Kostensätze der Motorräder rund 12 Mal höher als die der Pkw. Dieses Beispiel zeigt anschaulich, mit welcher Vorsicht fahrleistungsbezogene Lärmkostensätze zu verwenden sind, wenn nur ein Durchschnittswert verwendet wird, ohne Differenzierung nach räumlicher Situation, die einen sehr großen Einfluss auf das Ergebnis hat.

Tabelle 22: Durchschnittliche Lärmkosten je Fzkm gemäß Alternativmethode

räumliche Situation	Lärmkosten: Kostensätze in EUR-Cent ₂₀₁₆ / Fzkm					
	Lkw	Pkw	Lieferwagen	Motorräder	Linienbusse	Reisebusse
innerorts	5,0	0,35	0,52	4,6	3,4	3,4
außerorts	0,42	0,09	0,11	0,38	0,30	0,30
Autobahn	0,15	0,03	0,04	0,13	0,11	0,11
nicht differenziert	1,6	0,14	0,26	1,7	2,1¹⁴	0,62

Die Ergebnisse der beiden Berechnungsmethoden unterscheiden sich also erheblich. Für eine weitere Einordnung der Ergebnisse wurde zusätzlich ein Vergleich mit den Ergebnissen anderer Studien vorgenommen (vgl. Abbildung 43), wobei der Fokus nur auf dem Durchschnitt für alle Straßen liegt:

- ▶ Aktuelle Studie von (DG MOVE, 2019) mit der neusten Version des EU-Handbooks on external costs v.3: Aus dieser Arbeit liegen Kostensätze für die EU-28 vor, aber auch Kostensätze für Deutschland. Es liegen aber keine nach Straßentypen differenzierten Werte vor. Die Berechnungen in (DG MOVE, 2019) erfolgen auf einer ‘top-down’ Methode basierend auf der Anzahl Lärmbelastigter nach EU Umgebungslärmrichtlinie (analog zur Alternativmethode).
- ▶ UBA-Methodenkonvention 2.0 (Umweltbundesamt, 2014): Vorherige Version, die noch Lärmkostensätze pro Fzkm ausgewiesen hat. In der Methodenkonvention 2.0 sind Kostensätze für Straßen innerorts sowie der Mittelwert für alle Straßen ausgewiesen. Für Straßen außerorts und Autobahnen weist die Methodenkonvention 2.0 durchschnittliche Lärmkosten von 0 €-ct/Fzkm aus.
- ▶ Durchschnittskosten einer aktuellen Studie aus der Schweiz (Bieler et al., 2019): Hier erfolgte die Berechnung der Lärmkosten sehr umfassend (‘bottom-up’), basierend auf flächendeckenden Analysen mit Hilfe eines Lärmimmissionsmodells, mit dem die Anzahl

¹⁴ Der Kostensatz für nicht differenzierte räumliche Situation (gewichtetes Mittel über alle räumliche Situationen) liegt bei den Linienbussen deutlich höher als bei den Reisebussen, weil die Linienbusse im Durchschnitt einen deutlich höheren Anteil der Fahrleistungen innerorts erbringen.

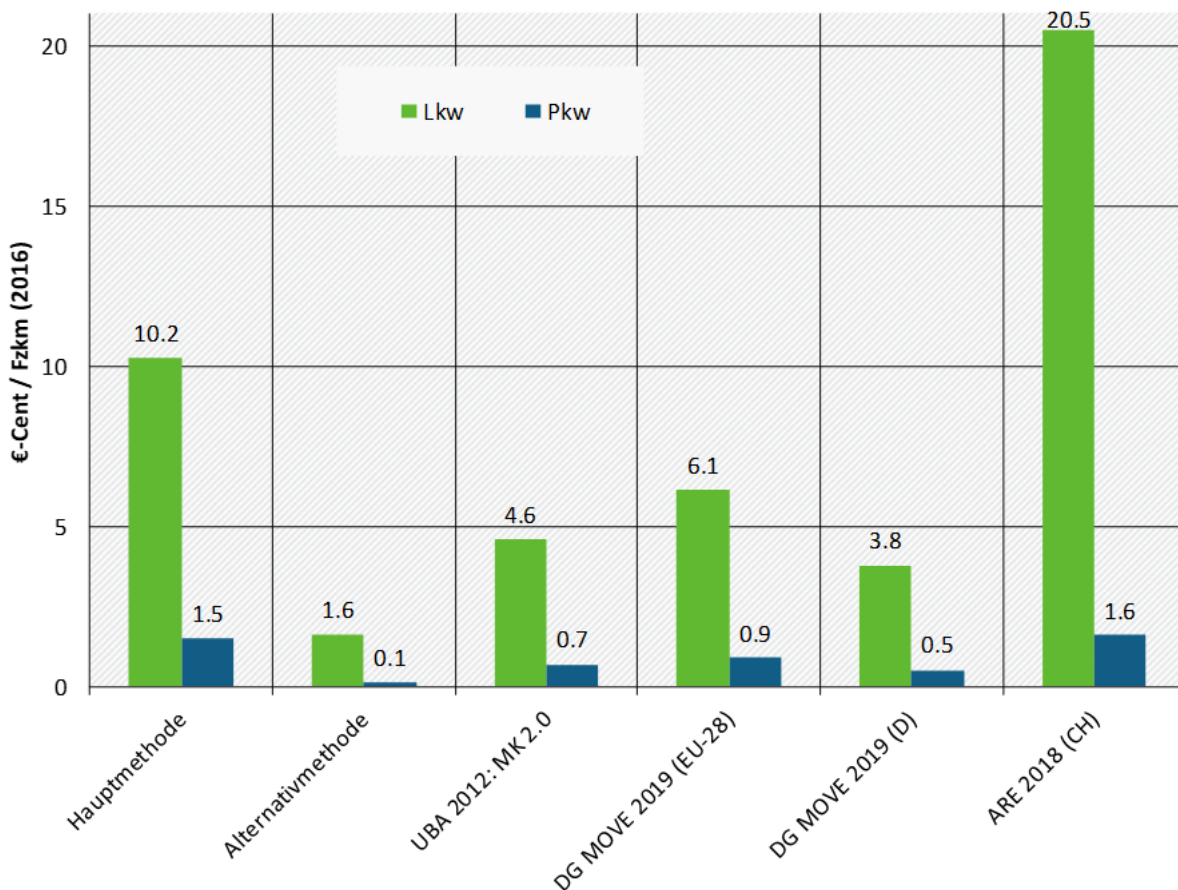
Belästigter abgeleitet wurde. Es werden aber keine nach räumlichen Situationen differenzierten Werte ausgewiesen.

Die folgende Abbildung 43 zeigt die Durchschnittskosten je Fzkm für die durchschnittliche räumliche Situation für Lkw und Pkw gemäß den beiden hier durchgeführten Berechnungsmethoden sowie den anderen, oben aufgeführten Quellen.

Insgesamt sind die Unterschiede der Kostensätze erheblich. Die Kostensätze gemäß Hauptmethode gehören zu den höchsten Werten (Lkw ca. 10 €-ct/Fzkm, Pkw 1,5 €-ct/Fzkm). Nur die Ergebnisse aus der Schweiz zeigen noch höhere Durchschnittskosten. Andererseits sind die Ergebnisse gemäß Alternativmethode deutlich am niedrigsten.

In Bezug auf die relativen Unterschiede zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln ergibt sich folgendes Bild: Die durchschnittlichen Lärmkosten pro Fzkm der Lkw liegen bei den meisten Studien um den Faktor 5 bis 7 höher als bei Pkw. Nur in der Schweizer Studie (Bieler et al., 2019) ist der Unterschied größer (Lkw 13-fach höhere Kosten als Pkw).

Abbildung 43: Durchschnittliche Lärmkosten je Fzkm: Vergleich mit anderen Studien



Quellen: (Umweltbundesamt, 2014), (DG MOVE, 2019), (Bieler et al., 2019).

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus anderen Studien kann folgendes Fazit zu den Berechnungen im vorliegenden Vorhaben gezogen werden:

- Die Ergebnisse der Hauptmethode (Tabelle 21) liegen in der gleichen Größenordnung wie bei anderen Studien, obwohl sich der methodische Ansatz erheblich unterscheidet. Verglichen mit anderen Studien liegen die Ergebnisse der Hauptmethode eher am oberen

Rand. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln sowie den verschiedenen räumlichen Situationen sind klar nachvollziehbar. In Bezug auf die Monetarisierung ist der Ansatz abgestimmt und eng an die UBA-Methodenkonvention 3.0 angelehnt.

- ▶ Die Lärmkostensätze der Alternativmethode (Tabelle 22) sind deutlich niedriger als die aller anderen hier zum Vergleich herangezogenen Studien. Dies zeigt sich auch beim Vergleich der Gesamtkosten für Straßenverkehrslärm in Deutschland, die bei der Alternativmethode 1,68 Mrd. EUR pro Jahr betragen (gleich hoch wie die in der Methodenkonvention 3.0 (Umweltbundesamt, 2019a) ausgewiesenen Gesamtkosten). Dieser Wert liegt deutlich unter den Gesamtlärmkosten des Straßenverkehrs der Vergleichsstudien. Im EU-Handbook (DG MOVE, 2019) liegen die gesamten Lärmkosten des Straßenverkehrs in Deutschland beispielsweise dreimal höher als gemäß Alternativmethode, obwohl sie ebenfalls auf einem Ansatz über die Gesamtzahl Lärmbetroffener gemäß Umgebungslärmrichtlinie basieren. Ein Grund für die niedrigen Werte der Alternativmethode liegt darin, dass in dieser Berechnung nur die Lärmbelasteten von über 55 dB (L_{den}) berücksichtigt werden, in den beiden anderen Studien dagegen schon ab tieferen Schwellenwerten (z. B. im EU-Handbook 50 dB). Ein weiterer Grund sind die unterschiedlichen Ansätze zur Monetarisierung (Kostensätze).

In Bezug auf die Anzahl Lärmbelasteter geht man generell davon aus, dass die Lärmbelastetenzahlen gemäß Umgebungslärmrichtlinie die tatsächliche Zahl der Lärmbelasteten erheblich unterschätzt. Gemäß (Jäschke, 2012) unterschätzen amtliche Lärmkartierungen die Zahl der realen Lärmbelasteten (Anzahl Lärmbelastete) um den Faktor 4 bis 5. Der Hauptgrund dafür liegt darin, dass der Kartierungsumfang nach Umgebungslärmrichtlinie nur Hauptverkehrswege und Ballungsräume umfasst und somit einen erheblichen Teil des Straßennetzes nicht beinhaltet.

- ▶ Insgesamt sind die Ergebnisse der Hauptmethode glaubwürdiger und qualitativ hochwertiger als die der Alternativmethode. Die Ergebnisse der vorliegenden Vertiefung zu den Lärmkosten liefern hilfreiche Hinweise zum Niveau der durchschnittlichen Lärmkosten des Straßenverkehrs sowie den Unterschieden zwischen Verkehrsmitteln und räumlichen Situationen. Im Gegensatz zu den anderen erwähnten Studien können mit der hier angewendeten Hauptmethode erstmals für Deutschland nach räumlichen Situationen differenzierte Kostensätze ausgewiesen werden.

Um Ergebnisse gemäß Hauptmethode zu erhalten, die auch für eine spätere Empfehlung zu räumlich differenzierten Lärmkostensätzen oder die Anwendung für eine zukünftig mögliche Internalisierung von Lärmkosten in der Lkw-Maut valide genug sind, müsste jedoch eine vertiefte, auf diese Fragestellung ausgerichtete Studie durchgeführt werden. Insbesondere müsste die zentrale Grundlage, die Anzahl stark belästigter Personen pro Fzkm/Jahr (wie in (Althaus, 2012) verwendet), für Deutschland ermittelt werden können.

Eine wichtige Erkenntnis der vorliegenden Berechnungen ist zudem, dass Durchschnittswerte für ein Verkehrsmittel wenig Aussagekraft haben und eine Differenzierung nach räumlichen Situationen essentiell ist, weil die räumliche Situation einen sehr großen Einfluss

auf die Kostensätze hat. Neben der räumlichen Differenzierung wäre auch eine zusätzliche Differenzierung nach Tag/Nacht wünschenswert und wichtig.

- Weil für andere Verkehrsarten (v. a. Schienen- und Luftverkehr) in dieser Studie keine Kostensätze ermittelt wurden, werden in der vorliegenden Arbeit die Lärmkosten nicht zu den anderen externen Kosten addiert. Ein Vergleich mit anderen Verkehrsträgern ist somit nicht möglich. Wir weisen die hier ermittelten Lärmkosten separat aus, weil sie hilfreiche Aussagen für den Vergleich verschiedener Verkehrsmittel auf der Straße sowie verschiedener räumlicher Situationen ermöglichen.

4.3 Systemische Bilanzierung

In diesem Kapitel wird die Anwendung der systemischen Bilanzierung anhand von verschiedenen Betrachtungsfällen gezeigt. Dabei stehen vor allem das Testen und Darstellen der systemischen Methodik im Vordergrund, wobei auf ein möglichst großes Spektrum an Verkehrsmitteln geachtet wurde. Soweit wie möglich wurde dabei auf bestehenden Analysen aufgebaut oder es wurden teilweise eigene grobe Abschätzungen getroffen. Die damit erhaltenen Werte ermöglichen zwar eine Einordnung der Einsparpotenziale, können jedoch eine ausführliche Studie mit eigener Datenerhebung zu den Themen nicht ersetzen.

Überblick Betrachtungsfälle

Die unterschiedlichen hier gezeigten Betrachtungsfälle decken eine große Vielfalt an Verkehrsarten sowie verschiedene Fragestellungen ab, wobei der Fokus auf dem Verlagerungspotenzial bzw. der Auswirkung der Einführung neuer Verkehrsmittel liegt.

Einen Überblick über die Betrachtungsfälle und ihre wichtigsten Eigenschaften zeigt Tabelle 23. In diesen Betrachtungsfällen werden stets Verlagerungspotenziale evaluiert und die möglichen Umweltbelastungen bzw. -entlastung bestimmt.

Tabelle 23: Betrachtungsfälle und ihre Eigenschaften

Betrachtungsfall	Transportart/ Distanzklasse	Betrachtete Verkehrsmittel	Fragestellung
Lastenrad	Güterverkehr/ nah	Lastenrad/ LNF/ SNF	Hypothetisches Verlagerungspotenzial von Paketzustellungen auf Lastenradkonzepte im urbanen Raum
Radschnellweg	Personenverkehr / nah	Fahrrad/ Pedelec/ Pkw/ ÖPNV	Hypothetisches Verlagerungspotenzial von Personennahverkehr auf das Fahrrad/ Pedelec durch den Aufbau von Radschnellwegen
Beschleunigung Bahnfernverkehr	Personenverkehr / fern	Flugzeug/ SPFV	Hypothetisches Verlagerungspotenzial von innerdeutschen Flügen auf die Bahn durch eine Reisezeitverkürzung im Bahnfernverkehr
Fernlinienbus	Personenverkehr / fern	Fernlinienbus/ Bahn/ Pkw/ Flugzeug	Mögliche reale Auswirkungen der Einführung von Fernlinienbussen
E-Tretroller	Personenverkehr / nah	E-Tretroller/ ÖPNV/ Fahrrad/ Pkw	Mögliche reale Auswirkungen der Einführung von E-Tretrollerleihsystemen

Betrachtungsfall	Transportart/ Distanzklasse	Betrachtete Verkehrsmittel	Fragestellung
SPNV Schleswig-Holstein	Personenverkehr / regional	SPNV/ Nahlinienbus/ Pkw	Mögliche reale Auswirkungen des Ausbaus des SPNV in Schleswig-Holstein zwischen 2006 und 2016

Anhand der großen Vielfalt an Betrachtungsfällen kann gezeigt werden, dass die erarbeitete Methodik zur systemischen Bilanzierung gut geeignet zur Beantwortung unterschiedlicher Fragestellungen ist.

Die nun folgenden Betrachtungsfälle sind somit als Anwendungsbeispiele zu verstehen, sie ermöglichen eine erste Einordnung der möglichen Wirkungen, können aber eine eigene, ausführliche Studie nicht ersetzen.

4.3.1 Lastenradeinsatz im innerstädtischen Verteilverkehr

4.3.1.1 Untersuchungsrahmen und Zielsetzung

Das Ziel der Analyse ist die Ermittlung des Verlagerungspotenzials im innerstädtischen Güterverkehr vom Lieferwagen (LNF) auf das Lastenrad und der hieraus resultierenden geänderten Umweltwirkungen. Der Fokus liegt hierbei ausschließlich auf Kurier-Express-Paket-Diensten (kurz: KEP) im städtischen Raum, da hier hohe Verlagerungspotenziale vorliegen. Die zentrale Fragestellung lautet:

Wie viele Paketzustellungen können vom konventionellen Zustellungskonzept auf das Lastenrad verlagert werden und welche Einsparungen können dadurch bei den Treibhausgasemissionen sowie den innerstädtischen Stickoxidemissionen erzielt werden?

Im Folgenden werden die Randbedingungen für die Analyse in Stichpunkten festgehalten:

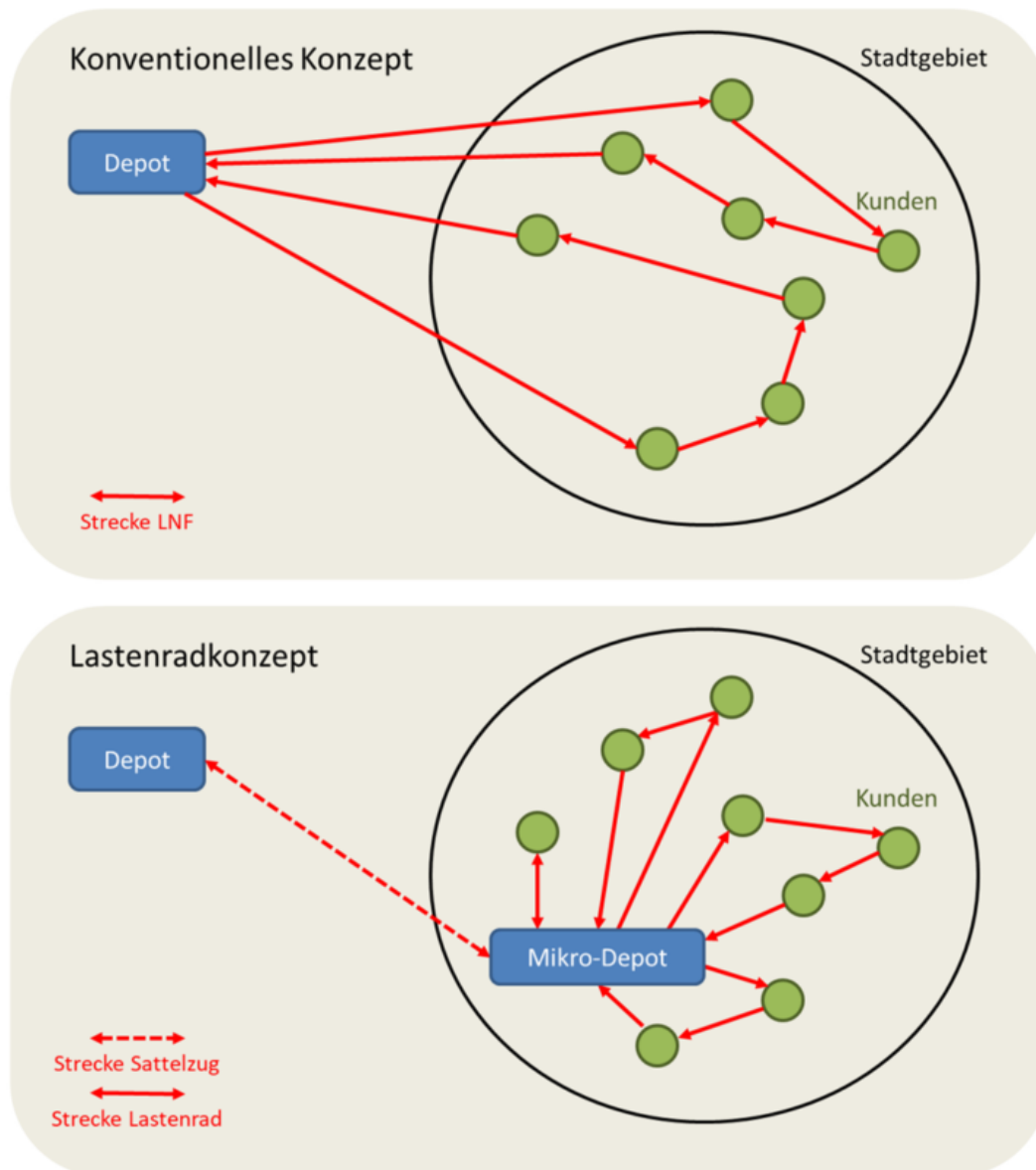
- ▶ Auftraggeber ist das Umweltbundesamt (UBA), die Zielgruppe ist die interessierte Öffentlichkeit und die Analyse wird erstellt vom ifeu.
- ▶ Betrachtet wird der innerstädtische Güterverkehr (KEP-Bereich) in den 80 deutschen Großstädten im Jahr 2017.
- ▶ Der Fokus liegt auf den Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus im, sowie den innerstädtischen Stickoxidemissionen in der Nutzungsphase (TTW).
- ▶ Betrachtungsgröße sind die jährlichen Emissionen aus der Paketzustellung im Betrachtungsgebiet.

Bei der Analyse wird lediglich das Paketaufkommen eines Jahres betrachtet ohne künftige Entwicklungen zu berücksichtigen. Zudem wird davon ausgegangen, dass vom Lastenradkonzept lediglich der innerstädtische Güterverkehr auf der „letzten Meile“ betroffen ist und es keine indirekten Auswirkungen auf den Personenverkehr oder andere Güterverkehre gibt.

Aktuell erfolgt der Pakettransport zwischen Regionaldepot und (innerstädtischem) Zustellungsort nahezu ausschließlich über konventionell angetriebene leichte Nutzfahrzeuge (LNF). Beim Lastenrad wird ein alternatives Konzept verfolgt. Hier werden die Pakete zunächst durch einen Sattelzug vom Depot zu einem Mikrodepot, welches in der Innenstadt liegt, transportiert. Im Anschluss erfolgt die innerstädtische Zulieferung per Lastenrad, wobei als

Lastenräder Pedelecs mit einer elektrischen Unterstützung und einer möglichen Zuladung von 1-1,5 m³ zum Einsatz kommen. Eine schematische Darstellung und Gegenüberstellung beider Konzepte zeigt Abbildung 44.

Abbildung 44: Gegenüberstellung der Zustellungskonzepte mittels LNF und Lastenrad



Damit sind folgende Transportarten, Distanzklassen sowie Verkehrsmittel betroffen:

- ▶ *Transportart:* Güterverkehr
- ▶ *Distanzklasse:* Nahverkehr in Agglomerationen
- ▶ *Verkehrsmittel – Hauptlauf:* Leichte Nutzfahrzeuge, Lastenräder
- ▶ *Verkehrsmittel – Vor-/Nachlauf:* Leichte Nutzfahrzeuge, Sattelzüge

Der Hauptlauf entspricht hierbei der effektiven Tour (d. h. dem Weg zwischen erster und letzter Auslieferung) und der Vor-/Nachlauf ist durch die Strecke zwischen Depot und der Innenstadt bzw. dem Mikro-Depot definiert.

Neben den WTW-Emissionen sollten beim Lastenradkonzept für die THG-Emissionen auch die Einflüsse der Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung nicht vernachlässigt werden, um ein vollständiges Bild der Umweltwirkungen zu erhalten. Bei den Stickoxidemissionen sind insbesondere die innerstädtisch auftretenden Emissionen von großer Relevanz, da viele deutsche Großstädte Probleme mit der Luftreinhaltung haben. Daher erfolgt hier eine Beschränkung auf die direkten (Auspuff-) Emissionen (TTW).

Einflüsse auf Hintergrundsystem

Neben Änderungen im Energieverbrauch, bei den Treibhausgasemissionen und den Luftschadstoffemissionen im Vordergrundsystem kommt es auch zu verschiedenen Einflüssen auf das Hintergrundsystem. Änderungen am Energiesystem treten, aufgrund der im Vergleich zum gesamten Treibstoff- bzw. Stromabsatz sehr geringen Änderungen durch die Verlagerung von leichten Nutzfahrzeugen auf Lastenräder, nicht auf. Bei den Fahrzeugen kann davon ausgegangen werden, dass sich die Fahrzeugkonzepte (also z. B. die Fahrzeuggrößen) und die Fahrzeugnutzung (z. B. die Lebensfahrleistung) der einzelnen Fahrzeugtypen durch das Lastenradkonzept nicht relevant verändern, es werden lediglich andere Fahrzeugtypen (also Lastenräder und Sattelzüge statt LNF) eingesetzt. Daher kann hier jeweils mit den Werten aus der typischen Nutzung gearbeitet werden.

Zudem können möglicherweise Einflüsse auf die Infrastruktur und die Flächennutzung auftreten, da es durch den Wegfall der leichten Nutzfahrzeuge und die Nutzung der Lastenräder zu einer Umverteilung der Lasten für den Straßenraum kommen kann. Weiterhin werden neue Flächen für die Mikrodepots benötigt. Auf eine Quantifizierung der Infrastruktur und Flächen wird jedoch aufgrund mangelnder Daten verzichtet.

Mögliche Änderungen können sich allerdings in der Flächennutzung bzw. der Infrastruktur ergeben, da neue innerstädtische Mikrodepots geschaffen werden müssen. Als Abschätzung für die Fläche der Mikrodepots könnte die Grundfläche eines Sattelzugs, der als Mikrodepot dient, dienen. Zusätzlich zu der Mikrodepotfläche sind auch Stellflächen für die Lastenräder vorzusehen, die über Auflademöglichkeiten verfügen müssen. Dafür fällt der von den Lieferwagen benötigte Platz weg. Eine Berücksichtigung der Stellplätze für die Fahrzeuge und Mikrodepots ist indes problematisch. Denkbar ist hier, dass eine Mischnutzung der Mikrodepots vorliegt, wenn z. B. die Depots temporär auf öffentlichen Plätzen errichtet werden. Eine Allokation wäre in diesem Fall schwierig. Zudem ist der Flächenbedarf für die Radstellplätze unklar, da es Konzepte gibt, in denen die Lastenräder nicht in der Stadt abgestellt, sondern in den Sattelzügen transportiert werden.

4.3.1.2 Datengrundlage und -beschaffung

Zur Bestimmung der Wirkungen des Lastenradkonzeptes werden zunächst Daten zum Paket-Aufkommen in 80 deutschen Großstädten (d. h. Städte mit mehr als 100.000 Einwohnern) im Jahr 2017 sowie Angaben zur Fahrzeugflotte und deren Emissionsfaktoren, den Änderungen der Verkehrsleistungen und den daraus resultierenden Änderungen am Fahrzeugpark und bei der Fahrzeugnutzung benötigt.

Mobilitätskenngrößen

Im Jahr 2017 betrug das Paketaufkommen in Deutschland nach (BIEK, 2018) 3,35 Mrd. Pakete. Dabei werden aktuell fast ausschließlich Lieferwagen für die Paketlieferung eingesetzt und es findet kaum eine Zustellung per Lastenrad statt. Die Zulieferung erfolgt an 300 Zuliefertagen, da an Sonntagen und gesetzlichen Feiertagen keine Pakete geliefert werden.

Experteneinschätzungen und Evaluierungen geben ein Verlagerungspotenzial der städtischen Paketzustellungen in einer Bandbreite von 20 % bis 90 % an. (Veenstra, 2017) und (Andersen /

Cherrett, 2014) haben ein Verlagerungspotenzial von 60 % angenommen, (Raiber, 2015) arbeitet mit einer Bandbreite von 20,75 und 90 % und (Leonardi et al., 2012) und (Bogdanski et al., 2017) geben 57 % bzw. 30 % an.

Fahrzeugkenngrößen

Die Fahrleistung bestimmt sich aus den Fahrten zwischen Verteilzentrum und Innenstadt (Vor-/Nachlauf) und der effektiven Tourenlänge (Hauptlauf). Die Fahrten in die Innenstadt werden anhand der Entfernung zwischen Verteilzentrum und Innenstadt sowie der Anzahl der für die Paketzustellung eingesetzten LNF berechnet. Für das konventionelle Konzept per LNF liegen Daten von neun Städten vor, wobei die hier betrachteten Städte teilweise im EU-Ausland liegen. Da alle betrachteten Städte Großstädte in industrialisierten Ländern sind und bzgl. der verkehrlichen und gesellschaftlichen Strukturen keine signifikanten Unterschiede vorliegen, werden die Daten der ausländischen Städte für den vorliegenden Fall verwendet. Tabelle 24 gibt einen Überblick der Kennwerte für die Paketzustellung per LNF im Ausgangszustand und der verwendeten Quellen.

Tabelle 24: Kennwerte für die Paketzustellung per LNF im Ausgangszustand

Stadt	Anzahl benötigter LNF pro 1.000 tägliche Pakete	Entfernung Verteilzentrum-Innenstadt [km]	Effektive Tourenlänge pro Paket [m]	Quelle
Berlin	6,5	11	33	(BIEK, 2017)
Brüssel	18,2	12	382	(Verlinde et al., 2017)
Frankfurt	6,2	17,3*	102	(Bogdanski, 2016)
Hamburg	10,5	10,5	49	(BIEK, 2017)
London	29	29	58	(Leonardi et al., 2012)
München	19,5	19,5	70	(BIEK, 2017)
Nürnberg	17,6	17,6*	146	(Bogdanski, 2016)
Stuttgart	12	12	69	(Raiber, 2015)
Wien	10,6	10,6*	242	(Jellinek et al., 2016)

Angegebene Werte sind aus den Quellen ermittelt. *Werte sind nicht in den Quellen gegeben; die Entfernung des Verteilzentrums zur Innenstadt/Mikrodepot wird anhand Google Maps abgeschätzt.

Für das Lastenradkonzept stehen demgegenüber weniger Daten zur Verfügung, sodass nicht alle der vorher genannten Städte abgedeckt werden. Folgende Tabelle gibt einen Überblick der benötigten Sattelzüge pro Paketzustellung und die effektive Tourenlänge pro Paket, die von dem Lastenrad zurückzulegen ist.

Tabelle 25: Kennwerte für die Paketzustellung per Lastenradkonzept

Stadt	Anzahl benötigter Sattelzüge pro 1.000 tägliche Pakete*	Entfernung Verteilzentrum-Mikrodepot [km]	Effektive Tourenlänge pro Paket [m]	Quelle
Berlin	1,0	11	/	(BIEK, 2017)
Brüssel	2,8	12	764	(Verlinde et al., 2017)

Stadt	Anzahl benötigter Sattelzüge pro 1.000 tägliche Pakete*	Entfernung Verteilzentrum-Mikrodepot [km]	Effektive Tourenlänge pro Paket [m]	Quelle
Frankfurt	0,9	17,3	/	(Bogdanski, 2016)
Hamburg	0,9	10,5	182	(BIEK, 2017), (Ninnemann et al., 2017)
London	0,9	29	268	(Leonardi et al., 2012)
München	1,0	19,5	/	(BIEK, 2017)
Nürnberg	0,9	17,6	/	(Bogdanski, 2016), (myLogistics, 2018)
Stuttgart	1,5	12	66	(Raiber, 2015)
Wien	1,0	10,6	332	(Jellinek et al., 2016)

* Die Anzahl der benötigten Sattelzüge ergibt sich aus dem Platzbedarf der Pakete (hergeleitet aus dem konventionellen Konzept bei einem Volumen des LNF von 14 m³) und dem Volumen eines Aufliegers von 91 m³

Benötigt werden demnach die Emissionsfaktoren der leichten Nutzfahrzeuge, Lastenräder und Sattelzüge (hier SNF >34-40t). Da hier lediglich der Einsatz innerhalb des städtischen Nahverkehrs erfolgt, können die Emissionsfaktoren für den Betrieb innerorts verwendet werden. Die Faktoren sind in Tabelle 26 aufgeführt.

Tabelle 26: Emissionsfaktoren innerorts – „Lastenradeinsatz im innerstädtischen Verteilverkehr“

	WTW - THG [g CO _{2eq} /Fzkm]	Fahrzeug - THG [g CO _{2eq} /Fzkm]	Infrastruktur - THG [g CO _{2eq} /Fzkm]	TTW - NO _x [g NO _x /Fzkm]
LNF	314,77	49,54	5,81	1,22
Sattelzug	1.449,85	83,35	35,83	4,89
Lastenrad	8,36	14,01	0,97	/

4.3.1.3 Methode und Berechnung

Mobilitätskenngrößen

Um Daten für die Verkehrsleistungsänderungen zu erhalten, muss zunächst das Verlagerungspotenzial (also die Zahl der Pakete, welche statt mit dem LNF mit einem Lastenrad ausgeliefert werden können) ermittelt werden. Dieses Verlagerungspotenzial wird insbesondere durch den geringen Aktionsradius der Lastenräder eingeschränkt. Es wird daher angenommen, dass der Einsatz lediglich in Gebieten erfolgen kann, die durch eine hohe Paketaufkommensdichte pro Fläche charakterisiert sind. Als potenzielle Gebiete werden hier die 80 deutschen Großstädte definiert. Angenommen wird dabei, dass das Paketaufkommen proportional zur Bevölkerung ist. In Deutschland wohnen etwa 32 % der Menschen in Großstädten (Statistisches Bundesamt, 2018), damit wird davon ausgegangen, dass auch 32 % des Paketaufkommens (1,07 Mrd./a) in Deutschland hier anfällt.

Für die Verlagerung werden im Folgenden drei Fälle unterschieden. Fall 1 „Pessimistisch“ geht von einer geringen Verlagerung von lediglich 30 % der innerstädtischen Pakete aus (0,32

Mrd./a). Im Fall 2 „Basis“ können ca. 60 % der Pakete in den Großstädten verlagert werden (0,64 Mrd./a). Wogegen im Fall 3 „Optimistisch“ 75 % der Pakete in den Großstädten durch das Lastenradkonzept bedient werden können (0,80 Mrd./a). Der Basisfall entspricht dem Mittelwert und die beiden anderen Fälle den Rändern des Wertebereichs aus den o. g. Quellen, wobei jedoch sowohl die Maximal- als auch Minimalwerte nicht betrachtet werden.

Es ist zu erwarten, dass die (theoretische) Verlagerung weder zusätzliches noch reduziertes Aufkommen hervorruft, sofern die Kosten der Paketzustellung für den Kunden in etwa gleich hoch bleiben. Die Anzahl der täglichen Pakete entspricht dem gesamten jährlichen Paketaufkommen dividiert durch die Zuliefertage. Demnach wird vereinfachend davon ausgegangen, dass eine Gleichverteilung der Zulieferung vorliegt. Tabelle 27 gibt einen Überblick des absoluten Verlagerungspotenzials in den drei Fällen.

Tabelle 27: Mögliche Verlagerungen im KEP-Bereich durch den Lastenradeinsatz

Ausgangszustand und Änderungen des Paketaufkommens	Pakete pro Jahr [Mrd.]	Pakete pro Werktag [Mio.]
Paketaufkommen insgesamt	3,35	11,17
Paketaufkommen in Großstädten	1,07	3,57
Fall 1 „Pessimistisch: Verlagertes Paketaufkommen“	0,32	1,07
Fall 2 „Basis: Verlagertes Paketaufkommen“	0,64	2,14
Fall 3 „Optimistisch: Verlagertes Paketaufkommen“	0,80	2,68

Fahrzeugkenngrößen

Der Hauptlauf ist in diesem Betrachtungsfall durch die effektive Route definiert. Im konventionellen Konzept erfolgt die Zustellung per LNF und beim Lastenradkonzept per Lastenrad. Der Pakettransport vom Verteilzentrum in die Innenstadt/zum Mikrodepot wird als Vor-/Nachlauf definiert. Während beim konventionellen Konzept sowohl für den Hauptlauf als auch für den Vor-/Nachlauf dieselben LNF eingesetzt werden, sind im Lastenradkonzept hierfür zusätzlich Sattelzüge einzusetzen, um den Pakettransport vom Verteilzentrum zum Mikrodepot (Vor-/Nachlauf) zu übernehmen. Über die Entfernung vom Verteilzentrum zur Innenstadt und die Länge der effektiven Tour lassen sich die Fahrleistungen ermitteln.

Die ermittelten fahrzeugseitigen Größen sind z. T. einer großen Bandbreite unterworfen, da zum einen Studien und Statistiken für mehrere Städte mit unterschiedlichen Randbedingungen gegeben sind und zum anderen Daten aus Pilotprojekten stammen, die nicht unter optimaler Ausnutzung der Potenziale durchgeführt wurden. Folgende Tabelle gibt einen Überblick der Kennwerte. Die Datengrundlage für das konventionelle Konzept wird als hinreichend genau erachtet, sodass der arithmetische Mittelwert der Kenngrößen für dieses Konzept als Eingangsgröße aller drei Fälle gewählt wird. Auch die Entfernung zwischen Verteilzentrum und Innenstadt/Mikrodepot wird als Mittelwert der gegebenen Daten festgelegt. Demgegenüber ist die Datengrundlage für das Lastenradkonzept größeren Bandbreiten unterworfen, sodass in den drei Fällen unterschiedliche Werte angesetzt werden.

Im Fall 1 „Pessimistisch“ werden viele Sattelzüge benötigt (1,5/1.000 tägliche Pakete) und die Lastenräder müssen eine große Distanz zurücklegen (332 m/Paket). Im Fall 2 „Basis“ werden durchschnittlich viele Sattelzüge benötigt (1,0/1.000 tägliche Pakete) und die Lastenräder müssen durchschnittliche Distanzen zurücklegen (261 m/Paket). Im Fall 3 „Optimistisch“ werden wenige Sattelzüge benötigt (0,9/1.000 tägliche Pakete) und die Lastenräder müssen

lediglich kurze Distanzen zurücklegen (182 m/Paket). Für alle Parameter werden stets die kleinsten bzw. größten Werte aus der Betrachtung genommen, um mögliche Ausreißer zu eliminieren.

Tabelle 28: Spezifische Fahrleistungen und benötigte Fahrzeuge – „Lastenradeinsatz im innerstädtischen Verteilverkehr“

Anzahl benötigter LNF pro 1.000 tägliche Pakete	Ø 6,5	Fahrzeuge/1.000 Pakete
Länge der effektiven Tour pro Paket bei LNF	Ø 105	m/Paket
Anzahl benötigter Sattelzüge pro 1.000 tägliche Pakete	Ø 1,0 (0,9-1,5)	Fahrzeuge/1.000 Pakete
Länge der effektiven Tour pro Paket bei Lastenrädern	Ø 261 (182-332)	m/Paket
Entfernung Verteilzentrum-Innenstadt	Ø 14,3	km

Die Fahrleistung des Hauptlaufs (effektive Tour) für LNF und Lastenrad kann durch folgende Gleichung ermittelt werden:

$$Fahrleistung_{HL} = \frac{Paketaufkommen}{Jahr} \cdot \frac{Fahrleistung_{effektive\ Tour}}{Paket}$$

Die Fahrleistung des Vor-/Nachlaufs für LNF und Sattelzug entspricht dem Weg vom Verteilzentrum in die Innenstadt/Mikrodepot und zurück. Sie kann durch folgende Gleichung bestimmt werden:

$$Fahrleistung_{VL/NL} = \frac{Paketaufkommen}{Tag} \cdot \frac{Fahrzeuganzahl}{Paket} \cdot 2 \cdot Distanz_{Verteilzentrum-Stadt}$$

Werden die Gleichungen auf den Ausgangszustand (nur konventionelles Zustellkonzept) angewendet, ergeben sich tägliche Fahrleistungen der LNF für den Hauptlauf (effektive Tour) in Höhe von rund 375.000 Fzkm. Für die Fahrten von/zu den Verteilzentren entstehen zusätzlich 664.000 Fzkm, sodass in Summe 1,04 Mio. Fzkm pro Tag auf der „Letzten Meile“ zurückgelegt werden. Dies entspricht einer jährlichen Fahrleistung in den deutschen Großstädten von 312 Mio. Fzkm. Die Berechnung für die drei Verlagerungsfälle erfolgt analog, sodass sich folgende Fahrleistungen ergeben:

Tabelle 29: Absolute Fahrleistungen in den Fällen – „Lastenradeinsatz im innerstädtischen Verteilverkehr“

Jährliche Fahrleistungen [Mio. Fzkm]	Ausgangszustand	Fall 1 „Pessimistisch“	Fall 2 „Basis“	Fall 3 „Optimistisch“
LNF	312	218	125	78
Sattelzug	0	14	18	21
Lastenrad	0	107	168	146

Berechnung der Umweltwirkungen

Die Umweltwirkungen der Lebenswegabschnitte werden anhand der Fahrleistungen der Fahrzeuge ermittelt. Angesichts der umfassenden Diskussionen bzgl. der Luftqualität in Städten werden neben den Treibhausgasmissionen des gesamten Lebenszyklus (exkl. Infrastruktur) auch die direkten Stickoxidemissionen in diesem Betrachtungsfall näher betrachtet.

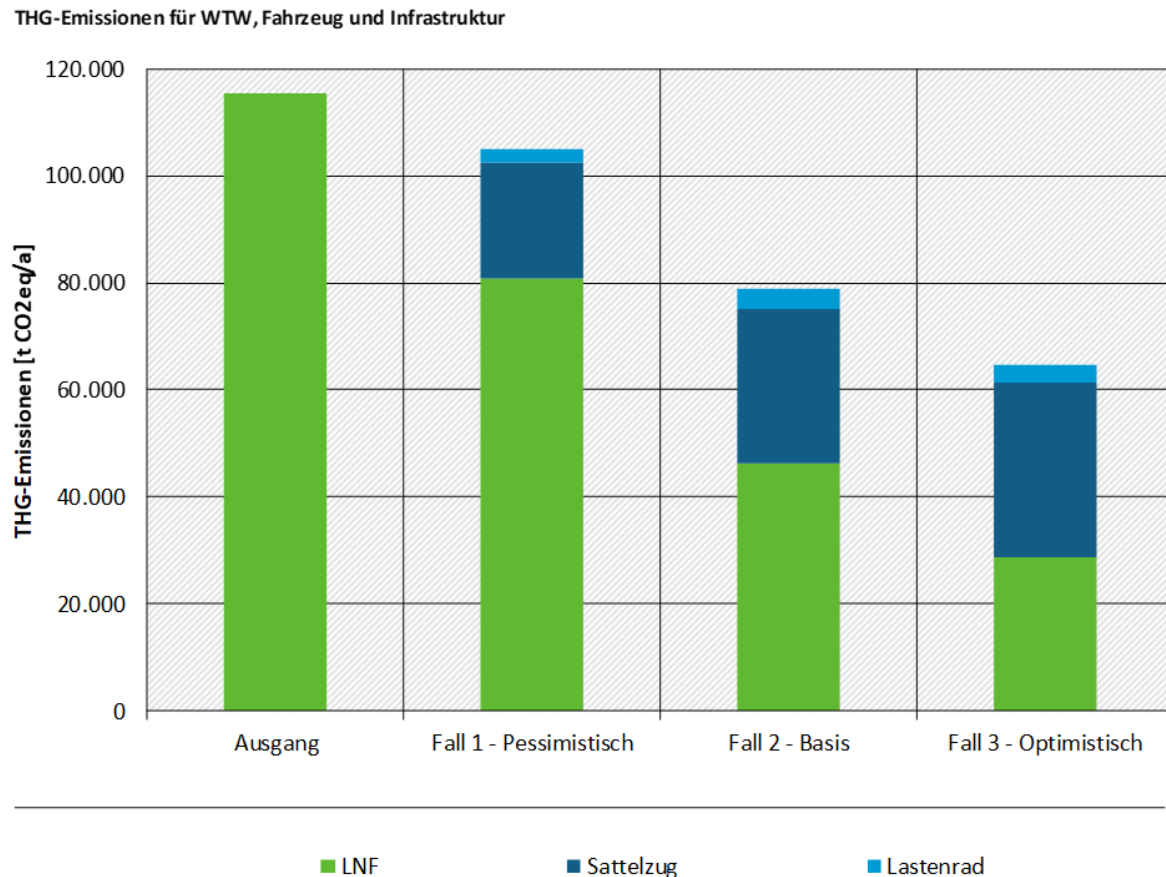
Die jährlichen Treibhausgas- und NO_x-Emissionen sind aufgrund der ausschließlichen Betrachtung von Innerortswerten abweichend vom Bundesdurchschnitt. Anhand der ermittelten Fahrleistungen und der Emissionsfaktoren ergeben sich die in der folgenden Tabelle gegebenen Werte.

Tabelle 30: THG- und innerstädtische NO_x-Emissionen in den Fällen – „Lastenradeinsatz im innerstädtischen Verteilverkehr“

Emissionen	Ausgangszustand	Fall 1 „Pessimistisch“	Fall 2 „Basis“	Fall 3 „Optimistisch“
WTW – THG [t CO _{2eq} /a]	98.161	89.608	67.338	55.768
Fahrzeug – THG [t CO _{2eq} /a]	15.449	13.460	10.065	7.637
Infrastruktur – THG [t CO _{2eq} /a]	1.812	1.866	1.546	1.336
Gesamt – THG [t CO _{2eq} /a]	115.421	104.934	78.949	64.741
TTW – NO _x [t NO _x /a]	381	334	242	196

Abbildung 44 stellt die jährlichen THG-Emissionen der drei Fälle dem Ausgangszustand gegenüber. Die THG-Einsparungen für das Jahr 2017 betragen demnach zwischen 10.500 und 50.700 t CO_{2eq}, wobei im Basisfall 36.500 t CO_{2eq} vermieden werden. Der überwiegende Anteil der Emissionen, die beim Lastenradkonzept entstehen, resultiert aus dem Betrieb der Sattelzüge. Die städtischen NO_x-Emissionen können im Basisfall um 139 t reduziert werden. Die Bandbreite ist mit 47 bis 184 t NO_x gegeben.

Abbildung 45: THG-Emissionen des Ausgangszustands und der drei Fälle – „Lastenradeinsatz im innerstädtischen Verteilverkehr“



Quelle: eigene Berechnung

4.3.1.4 Auswertung und Diskussion

Mit rund 312 Mio. km pro Jahr weisen die LNF des KEP-Bereichs einen nennenswerten Anteil an der Fahrleistung in deutschen Großstädten auf. Hieraus resultieren Treibhausgasemissionen von rund 115.400 t CO_{2eq}/a. Sofern im angegebenen Verlagerungspotenzial die Paketzustellung auf das Lastenradkonzept umgestellt wird, können diese Emissionen um ca. 32 % reduziert werden (Basisfall). Die angegebenen Emissionen beinhalten sowohl die WTW-Emissionen als auch die Emissionen für die Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung.

Allerdings ist zu beachten, dass die genutzten Daten eine große Bandbreite in den Ergebnissen liefern. Neben den Unsicherheiten der Flotten und Fahrleistungen sind auch die Verlagerungspotenziale nicht eindeutig über die gegebenen Zahlen zu identifizieren. Die genannten Größen hängen stark von den betrachteten Städten ab. Eine Hochrechnung der Verkehrsmengengerüste und Potenziale, die sich in den betrachteten Städten ergeben, ist daher für das gesamte Bundesgebiet problematisch. Eine Unsicherheit besteht zudem in der Anzahl der möglichen Städte, die für das Lastenradkonzept geeignet sind.

Unter den aktuellen Annahmen kann das Lastenrad in allen deutschen Großstädten eingesetzt werden. Wenn demgegenüber z. B. nur in allen Städten mit mehr als 200.000 Einwohnern das Konzept anwendbar sein sollte, so würde sich das ermittelte Potenzial um 20 % reduzieren. Denselben Einfluss weist auch der Anteil der verlagerbaren städtischen Pakete auf. Der angenommene Wert des Basisfalls von 60 % unterliegt nach den gegebenen Quellen einer

Bandbreite. Bei einer Variation der genannten Unsicherheiten erhält man eine THG-Vermeidung gegenüber dem Ausgangszustand in Höhe von 9-44 % (Basisfall: 32 %). In allen Fällen kann eine Reduktion der Treibhausgasemissionen nachgewiesen werden.

Bezüglich der städtischen NO_x-Emissionen ist im Durchschnittsfall von einer signifikanten Reduktion auszugehen. Im besten Fall könnten rund 184 t/a vermieden werden, wogegen im schlechtesten Fall lediglich von einer Reduktion in Höhe von 47 t/a ausgegangen werden kann. Im Basisfall ist eine Vermeidung in Höhe von 137 t/a zu erwarten. Das Resultat kann sich jedoch deutlich ändern, wenn andere Zusammensetzungen für die KEP-Flotte und somit Emissionsfaktoren angenommen werden.

Die angegebenen Potenziale beziehen sich lediglich auf das Jahr 2017. Da der Sektor stetig steigt (z. B. nach (BIEK, 2019) um +4,9 % von 2017 auf 2018), könnten so die absoluten Einsparungen bei sonst gleichen Bedingungen höher ausfallen. Es sollte jedoch beachtet werden, dass die Flottenzusammensetzung sich mit der Zeit verändert und Effizienzgewinne sowie Emissionsminderungen, insbesondere bei den LNF, erzielt werden können. Dies schmälert wiederum die Einsparpotenziale des Lastenradkonzepts. Insbesondere die Elektrifizierung des konventionellen Lieferkonzepts per LNF hätte einen großen Einfluss auf die Emissionen. Zudem würde die Implementierung des Lastenradkonzepts zeitverzögert erfolgen, woraus eine Änderung der Referenzflotte folgen würde.

Als problematisch könnte indes die Flächenbelegung erachtet werden. Zwar weisen die Lastenräder eine geringere Fahrzeuggröße auf als LNF, aber es werden deutlich mehr Fahrzeuge benötigt, die sich mit einer geringeren Geschwindigkeit bewegen. Dies könnte den Verkehrsfluss hemmen.

Das Fallbeispiel dient lediglich der Ermittlung der Einsparpotenziale gegenüber dem Ausgangszustand (2017). Es werden keine Aussagen darüber getroffen, wie eine Umstellung vorangetrieben werden könnte bzw. ob sie aus verschiedenen Gesichtspunkten sinnvoll ist. Eines der Hemmnisse sind die hohen Kosten des Lastenradkonzepts, welche insbesondere durch die höheren Personalkosten entstehen.

4.3.2 Ausbau von Radschnellwegen

4.3.2.1 Untersuchungsrahmen und Zielsetzung

Ziel der Analyse ist die grobe Abschätzung des Verlagerungspotenzials auf das Fahrrad in ausgewählten Regionen, welches durch den Bau von Radschnellwegen erreicht werden kann und der daraus folgenden geänderten Umweltwirkungen. Die zentrale Fragestellung ist:

Wie hoch sind die möglichen Einsparungen bei den Treibhausgas- und NO_x-Emissionen, die durch die Errichtung von Radschnellwegen erreicht werden können?

Im Folgenden werden kurz die Randbedingungen für die Analyse in Stichpunkten festgehalten:

- ▶ Auftraggeber ist das Umweltbundesamt (UBA), die Zielgruppe ist die interessierte Öffentlichkeit und die Analyse wird erstellt vom ifeu.
- ▶ Betrachtet wird der Personenverkehr im städtischen Nahverkehr im Jahr 2017 in den Metropolregionen Rhein-Ruhr, Rhein-Neckar und Hannover-Braunschweig-Göttingen-Wolfsburg sowie der Euregio Maas-Rhein.
- ▶ Der Fokus liegt auf den Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus, sowie den Stickoxidemissionen in der Nutzungsphase (TTW).

- ▶ Betrachtungsgröße sind die jährlichen Emissionen, die durch Radschnellwege vermieden werden können.

Radschnellwege sind Verbindungen im Radverkehrsnetz, die wichtige Zielbereiche mit hohem Verkehrsaufkommen verknüpfen sollen. Bei Radschnellwegen werden möglichst schnelle und vom Auto getrennte Verkehrswege angestrebt, die auch über größere Distanzen Städte und Gemeinden verbinden können.

Die Potenzialanalyse beschränkt sich auf aktuelle Verkehrsströme und lässt zeitliche Entwicklungen außer Acht. Zudem bleiben mögliche Einflüsse der Radschnellwege auf den Güterverkehr unberücksichtigt und es wird davon ausgegangen, dass durch den Bau von Radschnellwegen kaum induzierter Verkehr auftritt.

Damit sind folgende Transportarten, Distanzklassen sowie Verkehrsmittel betroffen:

- ▶ *Transportart:* Personenverkehr
- ▶ *Distanzklasse:* Nahverkehr in Agglomeration
- ▶ *Verkehrsmittel:* Fahrräder/Pedelecs, Pkw und ÖPNV

Als Ergebnis des Ausbaus der Radschnellweginfrastruktur in Deutschland kommt es zu Verlagerungen vom Pkw und dem öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) auf Fahrrad oder Pedelecs. Da die Distanzen im Stadtverkehr gering sind, kann der Vor-/Nachlauf vernachlässigt werden und besteht hauptsächlich aus kurzen Fußwegen.

Einflüsse auf Hintergrundsystem

Die Einflüsse auf das Hintergrundsystem betreffen vornehmlich den Infrastrukturausbau, da nur ein Teil der geplanten Vorhaben auf bereits bestehende Infrastruktur zurückgreifen kann und daher neue Radwege geschaffen werden müssen. Einflüsse auf die Energiebereitstellung treten nicht auf, da die Gesamtenergiemengen sehr klein sind. Unterschiede treten jedoch bei den eingesetzten Fahrzeugen und den damit verbundenen Aufwendungen für die Fahrzeugbereitstellung auf. Dies wird berücksichtigt, allerdings ohne dass sich die Fahrzeugeigenschaften gegenüber der typischen Nutzung verändern.

4.3.2.2 Datengrundlage und -beschaffung

Zurzeit sind in Deutschland mehrere Radschnellwege in der Planung für die bereits Kosten-Nutzen-Analysen erstellt wurden. In diesen sind auch die Verlagerungspotenziale enthalten und sie dienen somit als Quelle für die vorliegende Analyse. Anhand der Daten der Radschnellwege Ruhr, Rhein-Neckar, Euregio Maas-Rhein und Braunschweig-Wolfsburg werden Verlagerungspotenziale für diese spezifischen Fälle berechnet. Neben den verkehrlichen Änderungen sind in diesem Fallbeispiel auch infrastrukturelle Anpassungen im Fokus, denn die Kosten-Nutzen-Analysen geben auch Angaben über die zusätzlich zu versiegelnden Flächen.

Mobilitätskenngrößen

In keiner der betrachteten Regionen ist eine Radschnellweginfrastruktur vorhanden. Im Rahmen der Kosten-Nutzen-Analysen werden die Verkehrsmengen eines Vergleichsfalls ohne Radschnellweg mit einem Planfall mit Radschnellweg verglichen. Im Vergleichsfall wird von keiner Umsetzung der geplanten Radschnellwege ausgegangen, wogegen beim Planfall der Radschnellweg errichtet wurde und somit mögliche Verlagerungen bereits angenommen werden. Der Vergleichsfall kann somit als Ausgangszustand definiert werden. Für alle vier Regionen wird in den Quellen das Verlagerungspotenzial auf das Fahrrad durch die Errichtung

von Radschnellwegen gegenüber dem Ausgangszustand angegeben. Tabelle 31 gibt einen Überblick der relevanten Größen.

Tabelle 31: Verlagerungspotenzial auf das Fahrrad durch Errichtung von Radschnellwegen in vier Regionen

Region	Verlagerung Pkw-Rad [Fahrten/Tag]	Verlagerung Pkw-Rad [Pkm/a]	Verlagerung ÖPNV-Rad [Fahrten/Tag]	Verlagerung ÖPNV-Rad [Pkm/a]
Ruhr	95.000	33,77 Mio.	21.000	7,46 Mio.
Rhein-Neckar	nicht angegeben	8,03 Mio.	nicht angegeben	3,94 Mio.
Braunschweig-Wolfsburg	13.649	19,74 Mio.	1.517	2,19 Mio.
Euregio Maas-Rhein (nur deutscher Teil)	8.800	17,06 Mio.	6.900	5,78 Mio.

Quellen: Ruhr: (Regionalverband Ruhr, 2014), Rhein-Neckar: (Albrecht et al., 2018), Braunschweig-Wolfsburg: (Steinberg et al., 2017), Euregio Maas-Rhein: (PTV Transport Consult, 2017)

Fahrzeugkenngrößen

Der ÖPNV wird nicht weiter differenziert. Außer in der Euregio Maas-Rhein in der lediglich Linienbusse eingesetzt werden, kommen sowohl Nahlinienbusse als auch Straßenbahnen zum Einsatz. Vereinfacht wird hier der mittlere spezifische Emissionswert des ÖPNV für Deutschland (Nahlinienbus und SSU) angesetzt. Als Besetzungsgrad der Pkw wird bei allen Studien ein im Nahverkehr üblicher Wert von 1,2 Personen angesetzt, der somit geringer ist als der deutschlandweite Durchschnitt über alle Distanzklassen. Dieser Wert verändert sich durch die Radschnellwege voraussichtlich nicht. Die verwendeten Besetzungsgrade vom Fahrrad/Pedelec und ÖPNV entsprechen dem bundesdeutschen Mittelwert und sind daher mit 1 bzw. 26,43 gegeben. Der Marktanteil der Pedelecs liegt ungefähr bei 19 % (ZIV, 2018b).

Die fahrleistungsspezifischen Emissionsfaktoren sind in Tabelle 32 gegeben. Es werden hierbei die Emissionsfaktoren innerorts für Deutschland verwendet. Für die Infrastrukturbereitstellung der Fahrräder und Pedelecs werden die THG-Emissionen separat berechnet und daher findet der Durchschnittswert Deutschlands keine Anwendung.

Tabelle 32: Fahrleistungsspezifische Treibhausgasemissionen von Fahrrädern, Pedelecs und Pkw (innerorts)

Emissionen	Fahrrad	Pedelec	Pkw	ÖPNV
THG – WTW [g CO _{2eq} /Fzkm]	0	3,90	269,70	2.005,19
THG – Fahrzeug [g CO _{2eq} /Fzkm]	8,68	10,62	53,20	146,12
THG – Infrastruktur [g CO _{2eq} /Fzkm]	0,55	0,89	8,45	231,53
NO _x – TTW [g NO _x /Fzkm]	0	0	0,60	5,56

Einflüsse auf das Hintergrundsystem (Infrastruktur)

In den Nutzen-Kosten-Analysen wird aufgeführt, dass für die Radschnellwege neue Fahrbahnen vorzusehen sind. Demnach sind zusätzliche Flächen zu versiegeln. Folgende Tabelle gibt einen Überblick des zusätzlichen Flächenbedarfs in den jeweiligen Regionen.

Tabelle 33: Zusätzlich zu versiegelnde Fläche durch Errichtung von Radschnellwegen in vier Regionen

Region	Zusätzlich zu versiegelnde Fläche [m ²]
Ruhr	419.000
Rhein-Neckar	91.000
Braunschweig-Wolfsburg	15.200
Euregio Maas-Rhein (nur deutscher Teil)	64.000

Quellen: Ruhr, Rhein-Neckar, Braunschweig-Wolfsburg: siehe oben, Euregio Maas-Rhein: (Ingenieurbüro H. Berg & Partner, 2017)

4.3.2.3 Methode und Berechnung

Mobilitätskenngrößen

Die Verlagerung der Verkehrsleistung in den vier Regionen ist in Tabelle 34 gegeben. Es wird im Rahmen der Untersuchung angenommen, dass es zu keinem induzierten Verkehr kommt. Die daraus resultierenden Verkehrsleistungsänderungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 34: Änderung der Verkehrsleistung gegenüber dem Ausgangszustand durch die Errichtung von Radschnellwegen

Verkehrsleistungsänderung [Mio. Pkm/a]	Fahrrad/Pedelec	Pkw	ÖPNV
Ruhr	+41,23	-33,77	-7,46
Rhein-Neckar	+11,97	-8,03	-3,94
Braunschweig-Wolfsburg	+21,93	-19,74	-2,19
Euregio Maas-Rhein (nur deutscher Teil)	+22,84	-17,06	-5,78

Fahrzeugkenngrößen

In den Regionen Ruhr und Euregio Maas-Rhein kann das verlagerte Verkehrsaufkommen im ÖPNV ins Verhältnis zum gesamten Aufkommen in dem jeweiligen Einzugsgebiet gesetzt werden. Hieraus ergeben sich Verringerungen im Verkehrsaufkommen in Höhe von knapp 4-5 % in beiden Fällen. Zwar ist diese Änderung in den Einzugsgebieten der Radschnellwege nennenswert, jedoch bedienen die betroffenen Linien des ÖPNVs auch Gebiete, die außerhalb des Einzugsgebiets liegen. Somit ist die durchschnittliche Verkehrsleistungsänderung auf der gesamten Relation einer Linie als geringer einzuschätzen.

Daher wird im Fall 1 „Keine Anpassung der Betriebsleistung + Pedelecs“ angenommen, dass die Betriebsleistung des ÖPNV nicht aufgrund der geringeren Fahrgastzahl angepasst wird. Es wird hier zudem angenommen, dass ein Teil der Fahrleistung der Zweiräder von Pedelecs erbracht wird. Der Anteil der Pedelecs an der Fahrleistung entspricht vereinfacht dem Marktanteil von 19 %. Fall 2 „Anpassung der Betriebsleistung + Pedelecs“ hat dieselben Randbedingungen wie Fall 1, jedoch wird hier von einer proportionalen Absenkung der Betriebsleistung ausgegangen. Fall 3 „Anpassung der Betriebsleistung + nur Fahrräder“ kann als Optimalfall erachtet werden und geht sowohl von einer Anpassung der Betriebsleistung des ÖPNV aus, als auch von einem Anteil der Fahrräder an den Zweirädern von 100 %.

Die Verkehrsleistungsänderung beim Pkw bewirkt eine Reduktion der Fahrleistung. Diese wird proportional zum o. g. Besetzungsgrad von 1,2 angenommen. Es wird hierbei vorausgesetzt, dass der Besetzungsgrad konstant bleibt. Es steigen sowohl Beifahrer als auch Fahrer gleichermaßen auf das Fahrrad um. Die Fahrleistung beim Fahrrad/Pedelec steigt proportional mit dem Anstieg der Verkehrsleistung. Tabelle 35 fasst die Fahrleistungsänderungen zusammen.

Tabelle 35: Änderung der jährlichen Fahrleistung gegenüber dem Ausgangszustand durch die Errichtung von Radschnellwegen

Fahrleistungsänderung [Mio. Fzkm/a]	Fall 1 „Keine Anpassung der Betriebsleistung + Pedelecs“	Fall 2 „Anpassung der Betriebsleistung + Pedelecs“	Fall 3 „Anpassung der Betriebsleistung + nur Fahrräder“
Ruhr	Fahrrad: +33,40 Pedelec: +7,83 Pkw: -28,14 ÖPNV: /	Fahrrad: +33,40 Pedelec: +7,83 Pkw: -28,14 ÖPNV: -0,28	Fahrrad: +41,23 Pedelec: / Pkw: -28,14 ÖPNV: -0,28
Rhein-Neckar	Fahrrad: +9,70 Pedelec: +2,27 Pkw: -6,69 ÖPNV: /	Fahrrad: +9,70 Pedelec: +2,27 Pkw: -6,69 ÖPNV: -0,15	Fahrrad: +11,97 Pedelec: / Pkw: -6,69 ÖPNV: -0,15
Braunschweig-Wolfsburg	Fahrrad: +17,76 Pedelec: +4,17 Pkw: -16,45 ÖPNV: /	Fahrrad: +17,76 Pedelec: +4,17 Pkw: -16,45 ÖPNV: -0,08	Fahrrad: +21,93 Pedelec: / Pkw: -16,45 ÖPNV: -0,08
Euregio Maas-Rhein (nur deutscher Teil)	Fahrrad: +18,50 Pedelec: +4,34 Pkw: -17,06 ÖPNV: /	Fahrrad: +18,50 Pedelec: +4,34 Pkw: -17,06 ÖPNV: -0,22	Fahrrad: +22,84 Pedelec: / Pkw: -17,06 ÖPNV: -0,22

Berechnung der Umweltwirkungen

In die Betrachtung der Treibhausgasemissionen fließen sowohl die WTW-Emissionen der Fahrzeuge ein als auch die Emissionen, die durch die Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung entstehen. Die THG-Emissionen für die Infrastrukturbereitstellung können anhand der zusätzlich versiegelten Fläche ermittelt werden. Werden die Radschnellwege in Asphaltbauweise gebaut, dann kann ein Wert von 0,5 kg CO_{2eq}/m² pro Jahr angesetzt werden, sodass sich folgende Emissionen ergeben.

Tabelle 36: Zusätzlich THG-Emissionen durch die Errichtung der Radschnellwege

Region	THG-Emissionen der Infrastruktur [t CO _{2eq} /a]
Ruhr	209,5
Rhein-Neckar	45,5
Braunschweig-Wolfsburg	7,6
Euregio Maas-Rhein (nur deutscher Teil)	32,0

Aus den gegebenen Werten können die Emissionen aus folgender Tabelle ermittelt werden.

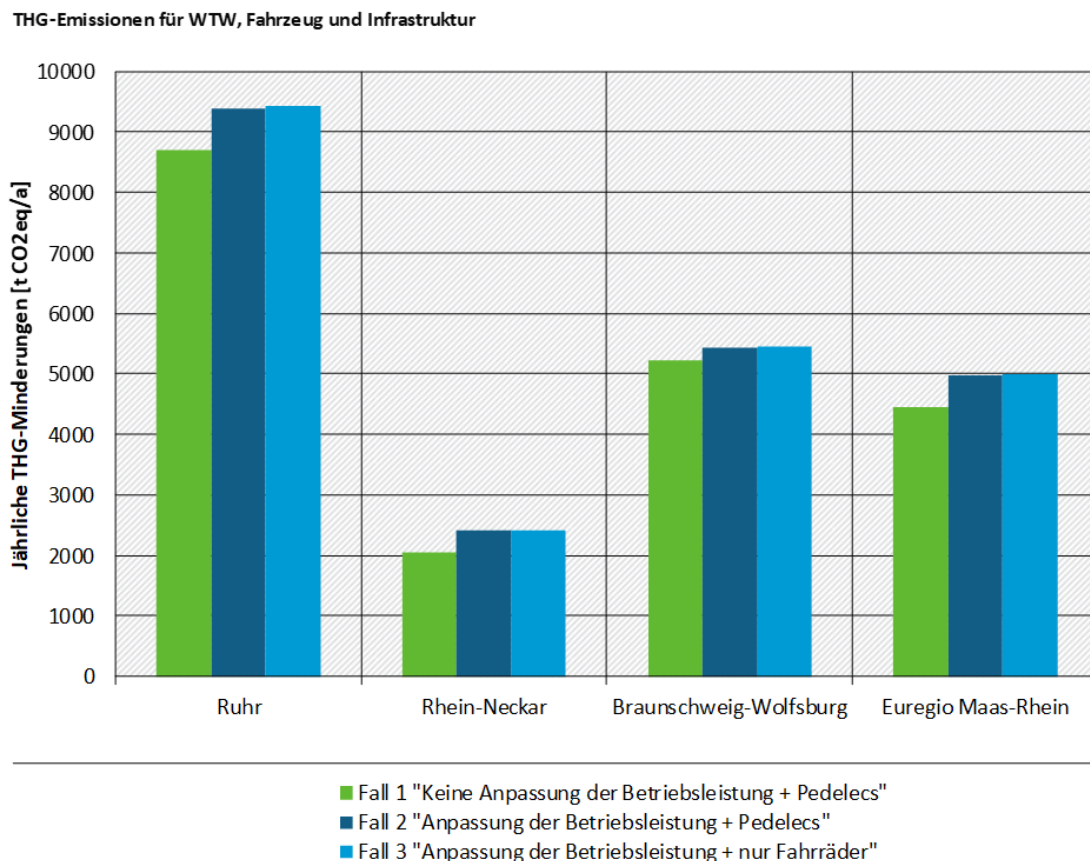
Tabelle 37: Änderung der jährlichen THG-Emissionen für WTW, Fahrzeug und Infrastruktur

Fall 1 „Keine Anpassung der Betriebsleistung + Pedelecs“, Fall 2 „Anpassung der Betriebsleistung + Pedelecs“, Fall 3 „Anpassung der Betriebsleistung + nur Fahrräder“

THG-Emissionen [t CO _{2eq} /a]	Fahrrad + Pedelec	Pkw	ÖPNV
Ruhr	Fall 1&2: +639 Fall 3: +590	-9.325	Fall 1:0 Fall 2&3: -673
Rhein-Neckar	Fall 1&2: +170 Fall 3: +1156	-2.217	Fall 1:0 Fall 2&3: -355
Braunschweig-Wolfsburg	Fall 1&2: +236 Fall 3: +210	-5.451	Fall 1:0 Fall 2&3: -197
Euregio Maas-Rhein	Fall 1&2: +270 Fall 3: +243	-4.711	Fall 1:0 Fall 2&3: -521

Abbildung 46 zeigt die Summe der jährlichen THG-Minderungen der vier Regionen für die drei Fälle. Ersichtlich wird, dass unter den getroffenen Annahmen stets Minderungen erzielt werden können. Die Bereiche liegen bei ca. 2.000 t CO_{2eq} pro Jahr in der Region Rhein-Neckar bis zu ca. 9.500 t CO_{2eq}/a beim RS1.

Abbildung 46: Jährliche THG-Minderungen der vier Regionen – „Ausbau von Radschnellwegen“



Quelle: eigene Berechnung

Die innerstädtischen NO_x-Emissionen können durch Radschnellwege ebenfalls reduziert werden. Folgende Tabelle gibt einen Überblick der jährlichen Minderungen. Sofern die Betriebsleistung im ÖPNV angepasst wird, entstehen geringfügig höhere Minderungspotenziale, wogegen der Einsatz von Pedelecs statt Fahrräder keinen Einfluss hat, da beide Verkehrsmittel keine direkten Emissionen aufweisen.

Tabelle 38: Änderung der städtischen TTW-NO_x-Emissionen – „Ausbau von Radschnellwegen“

NO _x -Emissionen [t/a]	Fall 1 „Keine Anpassung der Betriebsleistung“	Fall 2 & Fall 3 „Anpassung der Betriebsleistung“
Ruhr	-16,87	-18,44
Rhein-Neckar	-4,01	-4,84
Braunschweig-Wolfsburg	-9,86	-10,32
Euregio Maas-Rhein	-8,52	-9,74

4.3.2.4 Auswertung und Diskussion

Die THG-Vermeidung, die aus dem Ausbau des Radschnellwegnetzes resultieren kann, beziffert sich je nach Region auf einen Wert von 2.000-9.500 t CO_{2eq}/a. Ein Vergleich der Regionen untereinander ist jedoch schwierig, da sich zum einen die städtebaulichen und verkehrstechnischen Ausgangslagen unterscheiden und zum anderen die Einzugsbereiche mitsamt der Bevölkerung stark voneinander abweichen. Der Einsatz von Pedelecs statt Fahrrädern hat nur einen geringen Einfluss auf das THG-Minderungspotenzial.

Neben diesen Minderungen ist auch eine Reduktion der städtischen NO_x-Emissionen zu erwarten. Diese liegt je nach Region im Bereich von 4,0-18,5 t pro Jahr. Somit könnten Radschnellwege einen spürbaren positiven Einfluss auf die Schadstoffimmissionen in urbanen Räumen haben. Neben diesen Effekten sind auch weitere vorteilhafte Aspekte zu nennen, wie z. B. die Lärmreduktion oder die Gesundheitsförderung.

Problematisch an der Quantifizierung von perspektivischen Potenzialen ist, dass keine zeitliche Entwicklung der Emissionsfaktoren bei den anderen Verkehrsmitteln betrachtet wird. Wenn unter sonst gleichen Bedingungen z. B. batterieelektrische Pkw eingesetzt werden oder der Besetzungsgrad der Pkw sich durch Maßnahmen erhöht, würde dies die ermittelten CO_{2eq}- und NO_x-Einsparpotenziale verringern.

Wünschenswert wäre die Ableitung von deutschlandweiten Potenzialen zum Aufbau einer Radschnellweginfrastruktur in Ballungsräumen. Allerdings hat das betrachtete Fallbeispiel gezeigt, dass die Bedingungen in den Regionen jeweils sehr unterschiedlich sind (z. B. aufgrund unterschiedlicher Topographien, Bevölkerungsdichten und bestehender Infrastruktur), sodass eine Übertragbarkeit auf weitere Regionen kaum möglich ist. Da es in Deutschland jedoch acht weitere Metropolregionen gibt, kann davon ausgegangen werden, dass es auch an anderen Orten ein Potenzial zur deutlichen Treibhausgas- und Stickoxidminderung durch den Ausbau der Radinfrastruktur gibt.

4.3.3 Verlagerung vom Flugverkehr auf den Zug durch Bahnschnellfahrstrecken

4.3.3.1 Untersuchungsrahmen und Zielsetzung

Ziel der Analyse ist die Abschätzung des Verlagerungspotenzials vom innerdeutschen Personenflugverkehr auf die Bahn durch einen Ausbau von Hochgeschwindigkeitsstrecken. Die zentrale Fragestellung ist:

Wie viel Verkehrsleistung kann im Personenverkehr vom Flugzeug auf die Bahn verlagert werden, wenn die Reisezeiten mit der Bahn durch schnellere Verbindungen reduziert werden?

Im Folgenden werden kurz die Randbedingungen für die Analyse in Stichpunkten festgehalten:

- ▶ Auftraggeber ist das Umweltbundesamt (UBA), die Zielgruppe ist die interessierte Öffentlichkeit und die Analyse wird erstellt vom ifeu.
- ▶ Betrachtet wird der innerdeutsche Personenflugverkehr im Jahr 2017.
- ▶ Der Fokus liegt auf den Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus.
- ▶ Betrachtungsgröße sind die jährlichen Emissionsänderungen, die aus der Verlagerung resultieren.

Bei der Analyse wird lediglich die Verkehrsleistung eines Jahres betrachtet ohne künftige Entwicklungen zu berücksichtigen. Zudem bleiben mögliche Einflüsse der Reisezeitverkürzung auf die Mobilitätsnachfrage außer Acht. Darüber hinaus werden vereinfacht auch mögliche Verlagerungen von anderen Verkehrsmitteln wie dem Pkw auf den Zug nicht berücksichtigt.

Damit sind folgende Transportarten, Distanzklassen sowie Verkehrsmittel betroffen:

- ▶ *Transportart:* Personenverkehr
- ▶ *Distanzklasse:* Fernverkehr
- ▶ *Verkehrsmittel:* Flugzeug/Bahn (Fernverkehr)

Als Ergebnis der Verkürzung der Reisezeit im Personenfernverkehr bei der Bahn in Deutschland kann es zu Verlagerungen vom Flugzeug auf die Bahn kommen. Es wird angenommen, dass die Verlagerung lediglich auf die Größe „Reisedauer“ zurückzuführen ist. Weitere Faktoren, wie z. B. die Preisentwicklung bleiben unberücksichtigt. Da insbesondere beim Flugverkehr die Dauer der Wege zum Flughafen bzw. vom Flughafen zum Ziel einen erheblichen Anteil innehat, ist diese hier zu berücksichtigen. Der Einfluss des Vor-/Nachlaufs auf die Gesamtumweltwirkungen wird demgegenüber als gering erachtet und wird daher vernachlässigt, da i. d. R. die zurückgelegten Distanzen des Hauptlaufs um ein Vielfaches länger sind als die Distanzen zum Bahnhof/Flughafen bzw. vom Bahnhof/Flughafen zum Ziel.

Einflüsse auf Hintergrundsystem

Die Einflüsse auf das Hintergrundsystem betreffen vornehmlich den Infrastrukturausbau, da nur bedingt schnellere Bahnverbindungen mit der bestehenden Schieneninfrastruktur realisiert werden können. Leider ist eine Quantifizierung dieser Effekte im Rahmen des Vorhabens nicht möglich, daher wird vereinfacht davon ausgegangen, dass sich durch die Ausweitung der Schienenverkehrsleistung keine Änderungen in den Infrastrukturaufwendungen pro Personenkilometer ergeben. Ähnliches gilt für die eingesetzten Züge, wobei hier angenommen

wird, dass die Aufwendungen für die Fahrzeugbereitstellung der neu hinzukommenden Züge analog zu denen bestehender Schienenfernverkehrszüge sind.

4.3.3.2 Datengrundlage und -beschaffung

Mobilitätskenngrößen

Zur Bestimmung einer möglichen Verlagerung werden lediglich die zwanzig wichtigsten Flugrelationen in Deutschland im Jahr 2017 betrachtet. Tabelle 39 zeigt die Fluggastzahlen, die ungefähre Flugdistanz, die Dauer für den Vor-/Nachlauf sowie das Verkehrsaufkommen für die betrachteten Relationen. Da insbesondere bei Flügen die Dauer für die Wegabschnitte Start-Startflughafen und Landflughafen-Ziel einen hohen Anteil an der Gesamtreisezeit innehaben kann, wird dieser Aspekt zusätzlich berücksichtigt. Die Dauer dieser Wege stellt eine Abschätzung dar, da nicht jeder Reisende das nächstgelegene Stadtzentrum als Ziel hat. Sie entsprechen dem schnellsten Weg vom/zum Stadtzentrum zum/vom Flughafen wahlweise mit dem ÖPNV oder Pkw und wurden anhand von Google Maps ermittelt.

Tabelle 39: Fluggastzahlen, -distanzen und Reisedauer der zwanzig wichtigsten Flugrelationen in Deutschland

Relation	Flugdistanz [km]	Flugdauer [min]	Dauer Vor-/Nachlauf [min]	Aufkommen [Passagiere]
Berlin-München	505	80	68	1.972.901
Berlin-Frankfurt	424	70	58	1.956.370
Hamburg-München	613	85	56	1.738.973
Düsseldorf-München	487	75	47	1.554.605
Frankfurt-Hamburg	391	65	46	1.394.973
Köln-Berlin	478	75	52	1.232.847
Frankfurt-München	307	60	54	1.178.482
Düsseldorf-Berlin	478	70	51	1.144.793
Berlin-Stuttgart	512	75	53	1.037.326
Köln-München	456	65	48	988.723
Hamburg-Stuttgart	534	75	41	690.451
Düsseldorf-Hamburg	339	65	39	607.141
München-Hannover	489	65	59	545.296
Köln-Hamburg	357	60	40	486.034
Köln-Berlin (Schönefeld)	478	75	52	428.703
Düsseldorf-Frankfurt	180	50	37	425.076
Bremen-München	583	70	45	375.347
Frankfurt-Dresden	373	60	43	344.395
Düsseldorf-Nürnberg	363	65	34	233.399
Hamburg-Nürnberg	462	65	43	175.519

Quellen: Flugdistanz abgeschätzt durch die Luftlinie zwischen Flughäfen nach Luftlinien.org, Flugdauer nach flüge.de, Dauer Nebenlauf abgeschätzt durch schnellste Verbindung vom Flughafen in die Innenstadt nach Google Maps, Aufkommen nach (DESTATIS, 2018b)

Demgegenüber sind die schnellsten Verbindungen der Bahn in Tabelle 40 dargestellt. Die Fahrdistanz ist eine Abschätzung über die durchfahrenen Bahnhöfe der schnellsten Verbindung. Die Dauer des Nebenlaufs ermittelt den schnellsten Weg zwischen Bahnhof und Stadtzentrum mit dem schnellsten Transportmittel (ÖPNV, Pkw, Fußweg). Eine dezidierte Angabe des Verkehrsaufkommens auf den angeführten Relationen liegt bei der Bahn im Gegensatz zum Flugverkehr nicht vor.

Tabelle 40: Fahrdistanzen der Bahn auf den ausgewählten zwanzig Relationen

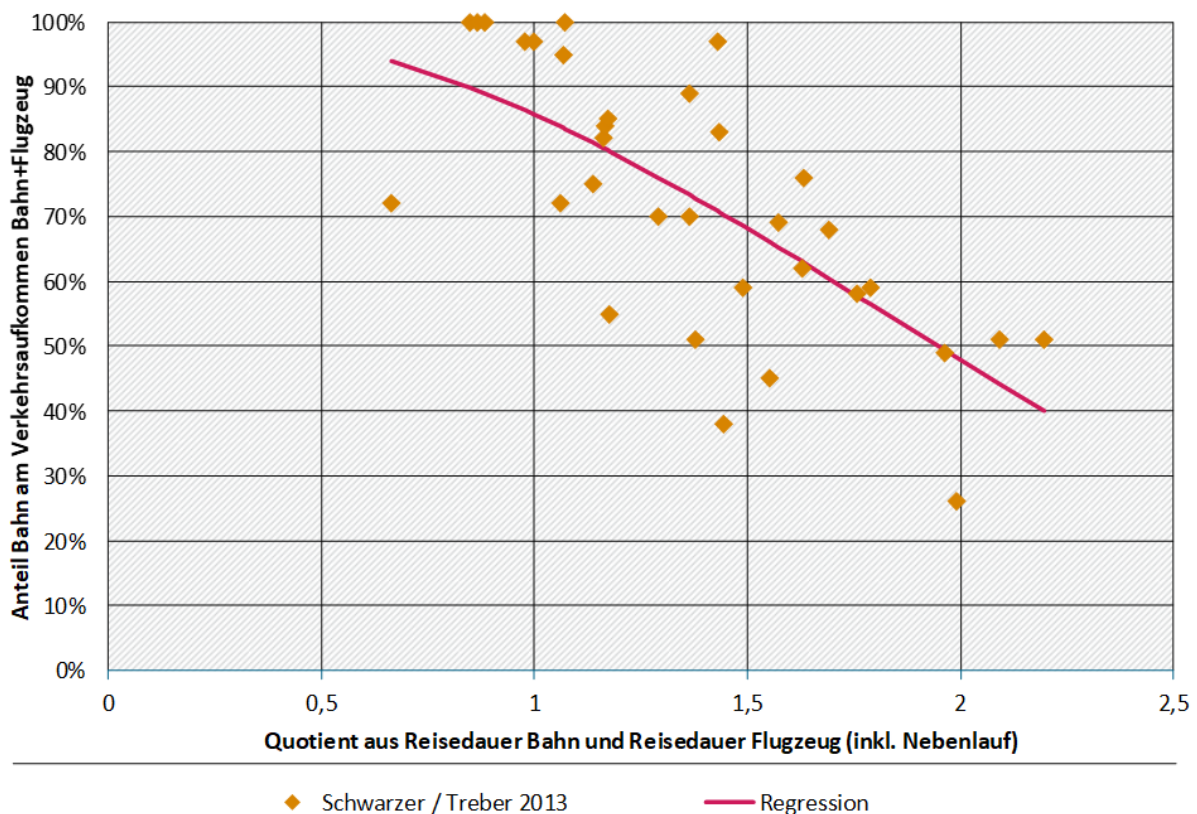
Relation	Fahrdistanz [km]	Fahrdauer [min]	Dauer Vor-/Nachlauf [min]
Berlin-München*	611	270	22
Berlin-Frankfurt*	450	255	18
Hamburg-München	864	371	14
Düsseldorf-München	538	288	12
Frankfurt-Hamburg	400	235	10
Köln-Berlin	528	257	15
Frankfurt-München	340	192	16
Düsseldorf-Berlin	672	265	14
Berlin-Stuttgart	620	331	16
Köln-München	503	277	13
Hamburg-Stuttgart	569	334	8
Düsseldorf-Hamburg	392	222	6
München-Hannover	549	274	13
Köln-Hamburg	392	244	7
Köln-Berlin (Schönefeld)	528	257	15
Düsseldorf-Frankfurt*	203	105	8
Bremen-München	633	385	14
Frankfurt-Dresden	426	263	12
Düsseldorf-Nürnberg	387	119	11
Hamburg-Nürnberg	682	300	13

*ohne ICE-Sprinter-Verbindungen; Quellen: Fahrdistanz und -dauer: bahn.de, Dauer Nebenlauf abgeschätzt durch schnellste Verbindung vom Flughafen in die Innenstadt nach Google Maps

Die Verkehrsleistungsänderung aufgrund von Verkürzungen der Reisezeit bei der Bahn werden anhand (Schwarzer/Treber 2013) ermittelt. Hier werden für ausgewählte Relationen (im In- und Ausland) die modale Aufteilung zwischen Bahn und Flugzeug sowie die Reisedauer mit der

Bahn angegeben. Von Relevanz ist das Verhältnis der Reisezeit mit der Bahn zur Reisezeit mit dem Flugzeug, sodass für die in der Quelle gegebenen Relationen ergänzend die Flugdauer zu bestimmen ist. Die Flugdauer wird anhand der Start- und Zielflughäfen ermittelt. Die Dauer für den Nebenlauf wird für die gegebenen Relationen analog zu den o. g. innerdeutschen Relationen bestimmt. Anhand des Quotienten der gesamten Reisedauer (inkl. Nebenlauf) bei der Bahn zur Reisedauer beim Flugzeug und dem gegebenen Anteil am Verkehrsaufkommen kann eine Kurve abgeleitet werden, die in Abbildung 47 dargestellt ist. Es liegt zwar eine deutliche Schwankung in den Werten vor, jedoch ist die Tendenz erkennbar, dass mit einem steigenden Verhältnis Gesamtreisedauer Bahn zu Flugzeug der Anteil der Bahn sinkt.

Abbildung 47: Modale Aufteilung zwischen Bahn und Flugzeug in Abhängigkeit der Reisedauer



Quellen: (Schwarzer/Treber 2013) und eigene Berechnung

Um eine potenzielle Änderung des Modal Splits zwischen Bahn und Flugzeug herleiten zu können, ist die Verkürzung der Reisezeit bei der Bahn zu ermitteln. Als eine mögliche Umsetzung ist der Ausbau der Strecken denkbar, sodass auf den o. g. innerdeutschen Relationen ICE Sprinter eingesetzt werden können. ICE-Sprinter sind hierbei Hochgeschwindigkeitszüge, die mit nur wenigen Zwischenhalten zwischen Städten verkehren. Die prozentuale Reisezeitverkürzung, die durch solche Verbindungen erzielt werden können, wird anhand des Vergleichs zu „normalen“ Verbindungen ermittelt. Auf gewissen Strecken (z. B. Berlin-München oder Frankfurt-Berlin) werden bereits Sprinter-Verbindungen angeboten. Setzt man diese Reisezeit mit der Reisezeit ohne Nutzung der Sprinter-Verbindung ins Verhältnis, so ergibt sich im Mittel eine Reduktion der Reisezeit von 16 %. Tabelle 41 zeigt die Relationen auf denen eine Sprinter-Verbindung angeboten wird, sowie die jeweiligen Reisedauern.

Tabelle 41: Reisedauer der Bahn bei der Nutzung von ICE-Sprinter-Verbindungen und bei Nutzung von Verbindungen ohne ICE-Sprinter

Relation	Fahrdauer ohne ICE-Sprinter	Fahrdauer mit ICE-Sprinter	Zeitersparnis
Berlin-München	284 km	239 min.	16 %
Berlin-Nürnberg	198 km	171 min.	14 %
Halle-München	224 km	166 min.	26 %
Halle-Nürnberg	120 km	104 min.	13 %
Erfurt-München	168 km	136 min.	19 %
Erfurt-Nürnberg	82 km	69 min.	16 %
Frankfurt-Berlin	269 km	234 min.	13 %
Frankfurt-Düsseldorf	99 km	86 min.	13 %
Frankfurt-Köln	77 km	64 min.	17 %
Mittel			16 %

Quelle: Fahrdauer ermittelt über bahn.de

Fahrzeugkenngrößen

Es liegen keine Informationen zu den Auslastungsgraden und Kapazitäten beim Flugverkehr und bei der Bahn auf den betrachteten Relationen vor, sodass hier von den durchschnittlichen Kennzahlen ausgegangen wird. Die Flugzeugkilometer für die o. g. Relationen belaufen sich nach zu 74,5 Mio. Fzkm. Die spezifischen Umweltwirkungen sind somit über die folgende Tabelle gegeben. Die Auslastung der eingesetzten Flugzeuge ist über (DESTATIS, 2018b) gegeben.

Tabelle 42: Spezifische Klimawirkungen in CO_{2eq} nach IPCC 2013 und Auslastung für die Bahn und das Flugzeug

Verkehrsmittel	Material [g/Fzkm]	Infrastruktur [g/Fzkm]	Energie (WTW) [g/Fzkm]	Auslastung [%]	Kapazität
Bahn (FV)	199	3.585	9.614	55,63	520
Flugzeug (national)	12	215	19.081*	72,50	122

*beim Flugzeug werden die THG-Emissionen über den EWF (Emission Weighting Factor) angepasst, um die reale Klimawirkung zu ermitteln

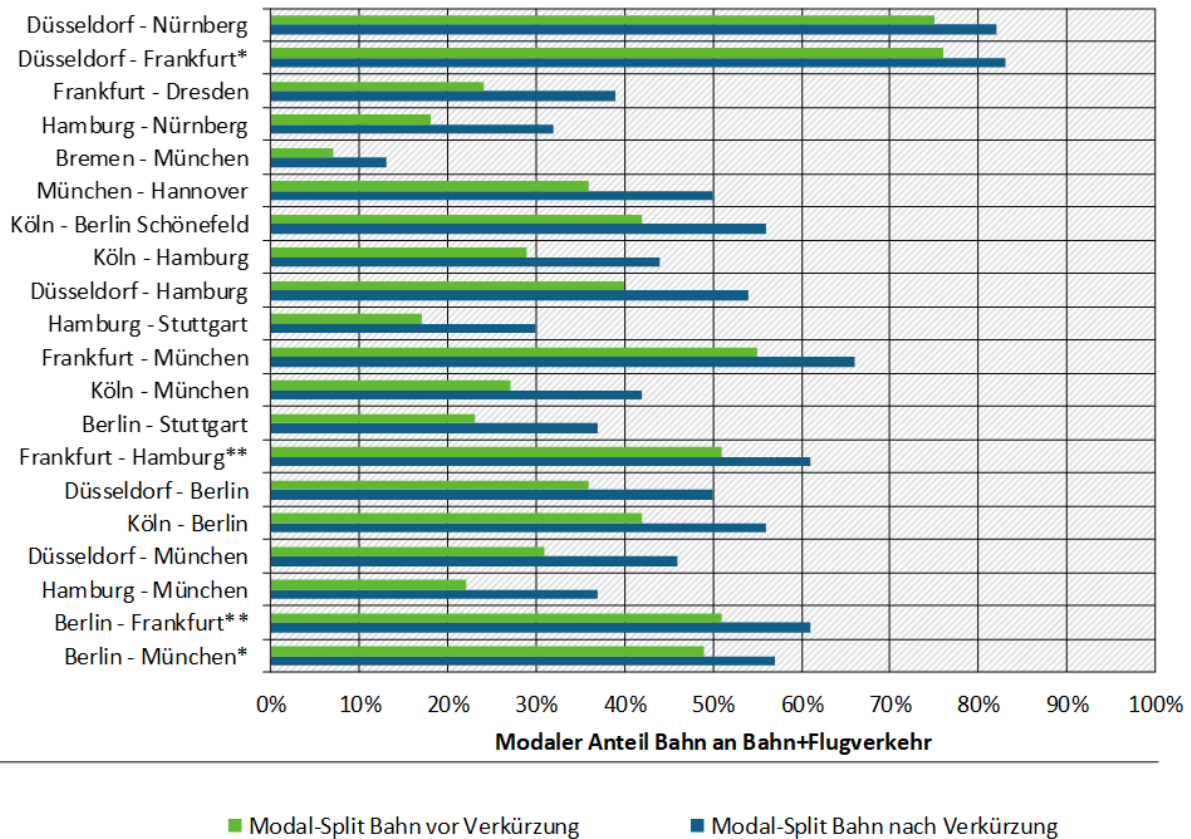
4.3.3.3 Methode und Berechnung

Mobilitätskenngrößen

Im Jahr 2017 betrug das Verkehrsaufkommen auf den zwanzig ausgewählten Relationen 18,5 Mio. Passagiere. Dies entspricht einer rechnerischen Verkehrsleistung von rund 8,5 Mrd. Pkm bei 74,5 Mio. Flugzeugkilometer. Für die Bahn ist das Aufkommen auf den genannten Relationen nicht bekannt. Es könnte zwar aus der Näherungskurve (Abbildung 47) und dem Verkehrsaufkommen des Flugverkehrs auch das Aufkommen der Bahn auf den Relationen abgeleitet werden, jedoch entspricht dies lediglich einer rechnerischen Größe und weist hohe Unsicherheiten auf, sodass eine Quantifizierung des Bahnaufkommens nicht sinnvoll erscheint.

Anhand der verkürzten Reisezeiten kann über die Kurve aus Abbildung 47 die Änderung des Modal Splits errechnet werden. Die Eckdaten der Änderung des modalen Anteils der Bahn ist in Abbildung 48 dargestellt.

Abbildung 48: Modale Anteile der Bahn an Bahn + Flugzeug vor und nach der Reisezeitverkürzung



Quelle: eigene Berechnung, *reale zeitliche Verkürzung für Berechnung verwendet; **Modal-Split vor Änderung direkt in der Quelle gegeben

Aus dem Verkehrsaufkommen im Flugverkehr und der rechnerischen modalen Aufteilung des Flugverkehrs vor der Verlagerung kann das Gesamtaufkommen (Bahn und Flugzeug) errechnet werden. Die Differenz der modalen Aufteilung vor und nach der Änderung multipliziert mit dem Gesamtaufkommen ergibt das verlagerte Verkehrsaufkommen. Ausgehend von den 18,5 Mio. Passagieren auf den zwanzig wichtigsten Flugrelationen in Deutschland kommt es zu einer Verlagerung von 3,8 Mio. Passagieren durch die Verkürzung der Reisezeit bei der Bahn. Unter Berücksichtigung der Flug- bzw. Fahrdistanzen ergibt sich eine Verkehrsleistungsänderung von -1,69 Mrd. Pkm im Flugverkehr und +1,99 Mrd. Pkm im Bahnverkehr.

Fahrzeugkenngrößen

Es wird bezüglich der fahrzeugseitigen Größen von drei Fällen ausgegangen. Im Fall „keine Vermeidung“ entsteht zusätzlicher Verkehr bei der Bahn, jedoch sinkt lediglich die Auslastung beim Flugzeug ohne Auswirkungen auf das Flugangebot. Im „Basisfall“ liegen keine Änderungen der Auslastung und Fahrzeugkapazitäten bei beiden Verkehrsmitteln vor. Daraus resultiert, dass die Verkehrsleistung einen proportionalen Einfluss auf die Fahrleistung ausübt. Demgegenüber wird im Fall „maximale Vermeidung“ eine Reduktion vom Flugverkehr proportional zur Absenkung der Verkehrsleistung angenommen, wobei der Anstieg des Aufkommens bei der Bahn lediglich einen Anstieg der Auslastung bewirkt (konstante Betriebsleistung). Die Energiebedarfe werden weder durch die Gewichtsänderungen aufgrund der sich ändernden

Passagieranzahl noch durch die Reisegeschwindigkeitserhöhung bei der Bahn beeinflusst. Tabelle 43 zeigt die Änderungen der Fahrzeugkenngrößen der drei Fälle.

Tabelle 43: Änderung der Fahrzeugkenngrößen bei der Verlagerung Flugzeug auf Bahn

Verkehrsmittel	Verkehrsleistung [Pkm]	Fahrleistung [Fzkm]	Auslastung [%]	Kapazität
„keine Vermeidung“	Bahn: +1,99 Mrd. Flugzeug: -1,69 Mrd.	Bahn: +6,9 Mio. Flugzeug: konstant	Bahn: konstant Flugzeug: sinkt	Bahn: konstant Flugzeug: konstant
„Basisfall“	Bahn: +1,99 Mrd. Flugzeug: -1,69 Mrd.	Bahn: +6,9 Mio. Flugzeug: -14,8 Mio.	Bahn: konstant Flugzeug: konstant	Bahn: konstant Flugzeug: konstant
„maximale Vermeidung“	Bahn: +1,99 Mrd. Flugzeug: -1,69 Mrd.	Bahn: konstant Flugzeug: -14,8 Mio.	Bahn: steigt Flugzeug: konstant	Bahn: konstant Flugzeug: konstant

Berechnung der Umweltwirkungen

Die Umweltwirkungen der Lebenswegabschnitte werden anhand der Fahrleistungsänderungen der Verkehrsmittel ermittelt. Diese Emissionsänderungen werden dem Ausgangszustand gegenübergestellt. Für die drei Fälle ergeben sich somit die folgenden Reduktionen der jährlichen THG-Emissionen:

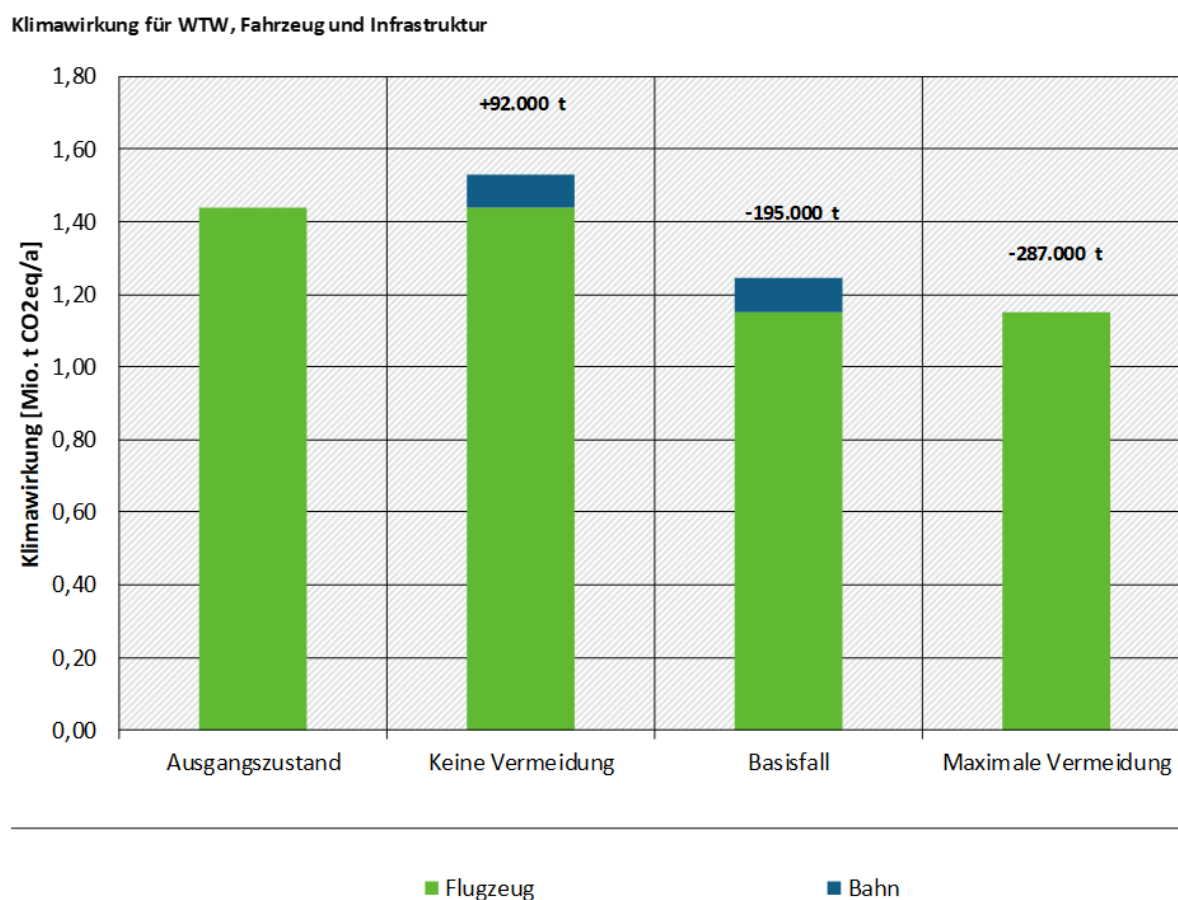
Tabelle 44: THG-Emissionen - Ausgangszustand und veränderte Zustände

Zustand	Energie (WTW) [t CO _{2eq} /a]	Fahrzeug [t CO _{2eq} /a]	Infrastruktur [t CO _{2eq} /a]	Gesamt [t CO _{2eq} /a]
Ausgangszustand	1.421.876 (Flugzeug)	918 (Flugzeug)	16.042 (Flugzeug)	1.438.835
„keine Vermeidung“	Ausgangszustand +/- 0 (Flugzeug) +66.012 (Bahn) =1.487.888	Ausgangszustand +/- 0 (Flugzeug) +1.365 (Bahn) =2.283	Ausgangszustand +/- 0 (Flugzeug) +24.619 (Bahn) =40.661	1.530.830
„Basisfall“	Ausgangszustand -283.379 (Flugzeug) +66.012 (Bahn) =1.204.509	Ausgangszustand -183 (Flugzeug) +1.365 (Bahn) =2.100	Ausgangszustand -3.197 (Flugzeug) +24.619 (Bahn) =37.464	1.244.072
„maximale Vermeidung“	Ausgangszustand -283.379 (Flugzeug) +/- 0 (Bahn) =1.138.497	Ausgangszustand -183 (Flugzeug) +/- 0 (Bahn) =735	Ausgangszustand -3.197 (Flugzeug) +/- 0 (Bahn) =12.845	1.152.076

Anmerkung: beim Flugzeug werden die TTW-Emissionen über den EWF angepasst

Für den Basisfall ergeben sich vermiedene Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 195.000 t pro Jahr. Dies entspricht einer Reduktion um 14 % bezogen auf die Emissionen des Flugverkehrs auf den ausgewählten Relationen. Stellt man die beiden Extremfälle gegenüber ist festzustellen, dass in dem optimistischen Fall eine Verringerung von 20 % erzielt wird, wogegen im pessimistischen Fall eine Erhöhung der Emissionen um 6 % entsteht. Die Gesamtemissionen sind in Abbildung 49 dargestellt.

Abbildung 49: Jährliche Klimawirkung der Fälle gegenüber dem Ausgangszustand



Quelle: eigene Berechnung

4.3.3.4 Auswertung und Diskussion

Aus den Berechnungen der Fälle geht hervor, dass eine Verlagerung vom Flugzeug auf die Bahn aufgrund einer Reisezeitverkürzung bei der Bahn nicht zwangsläufig zu einer Verringerung der gesamten THG-Emissionen führen muss. Bei einer Anpassung der Betriebsleistung bei der Bahn und einem gleichbleibenden Flugverkehr könnten sich zusätzliche THG-Emissionen von 92.000 t pro Jahr ergeben. Dieser Fall ist gegeben, wenn sich im Flugverkehr die Rentabilität weiterhin erhält oder durch zusätzliches Aufkommen die Verlagerung kompensiert wird. Demgegenüber können Reduktionen erzielt werden, wenn das Flugangebot angepasst wird. Hier sind Reduktionen von 195.000 t zu erwarten bzw. 287.000 t, sofern die Betriebsleistung bei der Bahn konstant bleibt und sich lediglich die Auslastung erhöht.

Die ermittelten Werte können lediglich als Abschätzung dienen, die nur unter den gegebenen Randbedingungen Gültigkeit hat. Problematisch ist hierbei die Annahme, dass weitere Faktoren wie z. B. die Preispolitik, von der betrachteten Systemänderung nicht beeinflusst werden. Jedoch ist eine Reduktion der Preise im Flugverkehr als Antwort auf das verbesserte Angebot der Bahn denkbar.

Zudem kann die Übertragbarkeit der Werte aus der verwendeten Quelle zur Ermittlung der Verlagerung als kritisch erachtet werden. Hier werden zwar auch die modalen Anteile von Bahn und Flugzeug für deutsche Relationen gegeben, aber der Großteil der betrachteten Relationen liegt im Ausland. Länderspezifische Gegebenheiten bleiben somit unberücksichtigt. Des Weiteren sind die ermittelten Reisezeitverkürzungen lediglich aus bestehenden ICE-

Sprinterverbindungen abgeleitet. Eine anderweitige Verkürzung der Reisezeit durch neue Strecken oder bessere Anbindungen (z. B. durch den Deutschland-Takt) wird in der Analyse nicht betrachtet und könnte das Potenzial signifikant steigern. Wichtig zu beachten ist, dass in der Analyse ausschließlich die Verlagerung vom Flugzeug auf die Bahn berücksichtigt wird. Sehr hohe THG-Minderungen können jedoch auch durch den Umstieg vom Pkw auf die Bahn entstehen. Diese Verlagerung ist bei einer Verbesserung des Angebots bei der Bahn ebenfalls zu erwarten. Auch die Verbesserung von innereuropäischen Relationen könnten die ermittelten Einsparungen deutlich nach oben korrigieren.

4.3.4 Liberalisierung des Fernlinienbusmarkts

4.3.4.1 Untersuchungsrahmen und Zielsetzung

Ziel der Analyse ist die Abschätzung der Umweltwirkung durch die Liberalisierung des Fernlinienbusmarkts in Deutschland. Die zentrale Fragestellung lautet:

Welche Systemwirkungen resultieren aus der Liberalisierung des Fernlinienbusmarkts bezüglich von Verkehrsleistungen und Umweltwirkungen?

Im Folgenden werden kurz die Randbedingungen für die Analyse in Stichpunkten festgehalten:

- ▶ Auftraggeber ist das Umweltbundesamt (UBA), die Zielgruppe ist die interessierte Öffentlichkeit und die Analyse wird erstellt vom ifeu.
- ▶ Betrachtet wird der innerdeutsche Personenverkehr beim Fernlinienbus im Jahr 2017.
- ▶ Der Fokus liegt auf den Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus.
- ▶ Betrachtungsgröße sind die jährlichen Emissionsänderungen, die aus der Verlagerung auf den Fernlinienbus resultieren.

Bei der Analyse wird lediglich die Verkehrsleistung eines Jahres betrachtet ohne künftige Entwicklungen zu berücksichtigen. Darüber hinaus werden vereinfacht auch mögliche Verlagerungen bei anderen Verkehrsmitteln (z. B. vom Pkw auf den Zug durch Fahrpreisanpassungen) nicht berücksichtigt.

Damit sind folgende Transportarten, Distanzklassen sowie Verkehrsmittel betroffen:

- ▶ *Transportart:* Personenverkehr
- ▶ *Distanzklasse:* Fernverkehr
- ▶ *Verkehrsmittel:* Flugzeug (national), Bahn, Fernlinienbus, Pkw

Durch die Einführung von innerdeutschen Fernlinienbusverbindungen kommt es zu Verlagerungen vom Flugzeug, der Bahn und dem Pkw auf den Fernlinienbus. Neben diesen Verlagerungen entsteht zudem zusätzlicher Verkehr, der ohne den Fernlinienbus nicht entstanden wäre. Neben den Verkehrsleistungen im Hauptlauf wird auch der Einfluss des Vor-/Nachlauf auf die Gesamtumweltwirkungen berücksichtigt.

Einflüsse auf Hintergrundsystem

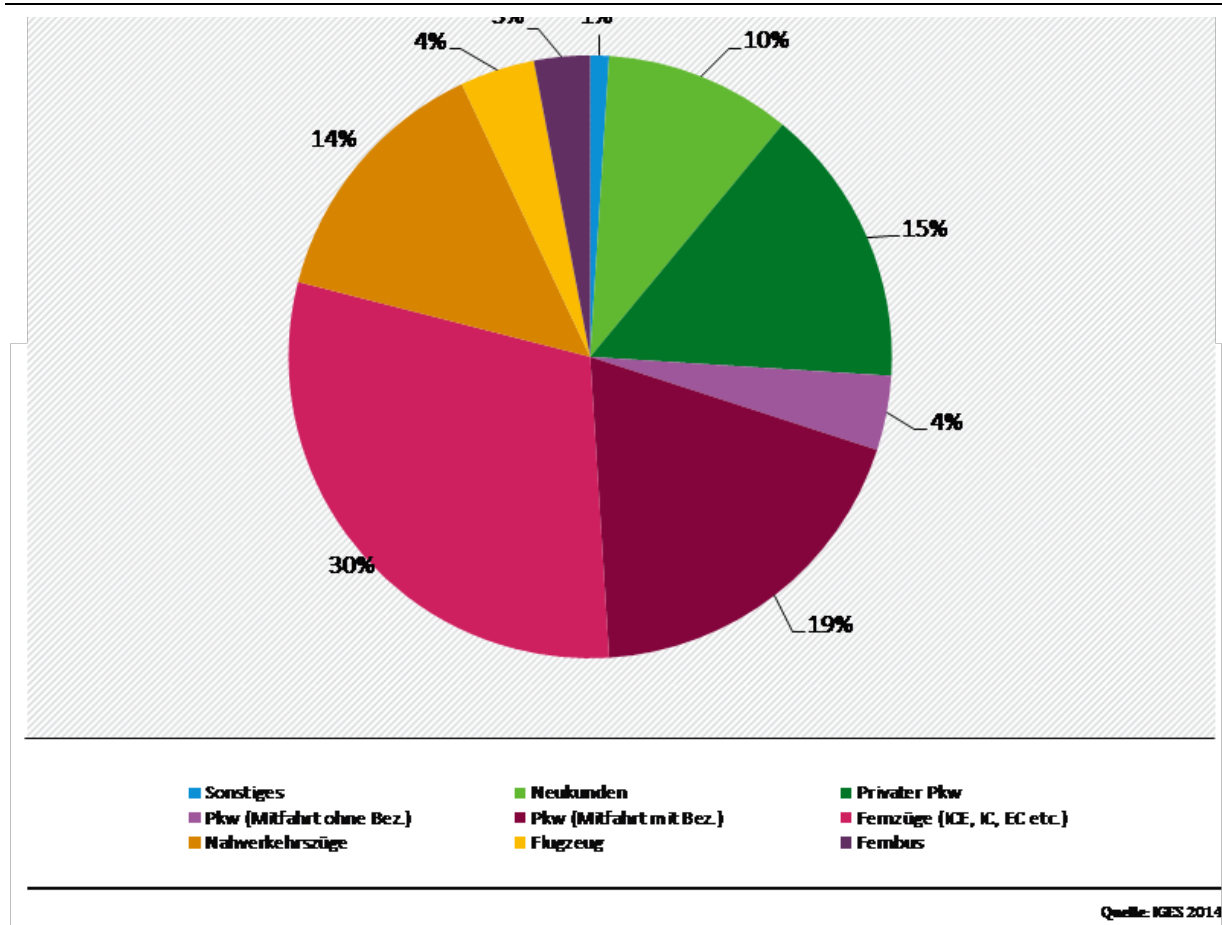
Die Einflüsse auf das Hintergrundsystem durch die Einführung der Fernlinienbusse sind gering, da die Busse auf bereits bestehenden Straßen eingesetzt werden. Auch Einflüsse auf die Energiebereitstellung sind vernachlässigbar.

4.3.4.2 Datengrundlage und -beschaffung

Mobilitätskenngrößen

Die Umweltwirkungen der Fernlinienbusse werden abgeschätzt durch die zusätzlichen THG-Emissionen, die durch den Fernlinienbusbetrieb entstehen. Die zusätzliche Verkehrsleistung beim Fernlinienbus ist mit 4,65 Mrd. Pkm gegeben (DESTATIS, 2019). Dies beinhaltet lediglich den innerdeutschen Verkehr in Deutschland. Das Aufkommen ist mit ca. 16,8 Mio. Fahrten gegeben, sodass sich hieraus eine durchschnittliche Fahrdistanz von 277 km ergibt. Neben der absoluten Höhe des Aufkommens ist durch eine Umfrage des IGES gegeben, welchen Ursprung der Aufkommensanstieg gegenüber den Vorjahren hat (IGES Institut, 2014). Die Fragestellung der IGES Befragung war: „Mit welchem Verkehrsmittel sind die Fahrgäste des Fernlinienbus bisher gereist?“ Die bei den Antworten angegebenen Anteile können der Abbildung 50 entnommen werden.

Abbildung 50: Abwanderung zum Fernlinienbus – „Womit sind Kunden bisher gereist?“



Quelle: (IGES Institut, 2014)

Um die gesamte Wegeketten zu berücksichtigen wird bestimmt wie die Fahrgäste zu den Haltestellen gelangen. Hierfür werden je nach Verkehrsmittel unterschiedliche Quellen verwendet. Für den Fernlinienbus, die Bahn und das Flugzeug sind Werte gegeben. Es wird zudem angenommen, dass es beim Pkw (Fahrer und Mitfahrer ohne Bezahlung) keinen Vor-/Nachlauf gibt. Bei der Kategorie „Mitfahrer mit Bezahlung“ werden dieselben Anteile angesetzt wie beim Fernlinienbus.

Neben den verwendeten Verkehrsmitteln des Vor-/Nachlaufs werden auch die zurückgelegten Distanzen benötigt. Da hierzu keine Daten vorliegen, werden Distanzen angenommen. Tabelle

45 fasst die vorhandenen und angenommenen Werte zusammen. In Klammern werden die angenommenen Distanzen angeführt. Die Anteile des Fernlinienbus' sind über interne Angaben von FlixBus aus dem Jahr 2017, der Bahn durch (Matiasek, 2011) und des Flugverkehrs durch (Bitter et al., 2010), (EBP, 2018) und (Pfragner, 2013) gegeben. Für den ÖPNV werden vereinfacht die Werte der Linienbusse (Nahverkehr) angenommen.

Tabelle 45: Anteile der Verkehrsmittel am Vor-/Nachlauf

	Hauptlauf	Fernlinienbus	Bahn (Nah- und Fernverkehr)	Pkw (Mitfahrer mit Bezahlung)	Flugzeug
Nebenlauf					
Bahn (FV)		1 % (6 km)	/	1 % (6 km)	9 % (15 km)
Bahn (NV)		7 % (6 km)	/	7 % (6 km)	9 % (15 km)
ÖPNV (Linienbus)		47 % (6 km)	12 % (5 km)	47 % (6 km)	25 % (15 km)
Pkw		28 % (6 km)	33 % (5 km)	28 % (6 km)	57 % (15 km)
Fahrrad		2 % (3 km)	14 % (3 km)	2 % (3 km)	0 %

Fahrzeugkenngrößen

Die Fahrleistung, Auslastung und Kapazität für alle relevanten Verkehrsmittel sind gegeben. Für die Emissionsberechnung werden die Emissionsfaktoren der typischen Nutzung pro Fahrleistung der jeweiligen Verkehrsmittel in Deutschland verwendet. Tabelle 46 fasst die relevanten Daten zusammen.

Tabelle 46: Fahrzeugkenngrößen – „Fernlinienbus“

	Fernlinienbus	Bahn (Fernverkehr)	Bahn (Nahverkehr)	Pkw	Flugzeug (national)
Auslastung	57,21 %	55,63 %	27,45 %	32,35 %	72,50 %
Kapazität	56,6	520,0	332,0	4,5	122,0
THG-Emissionen – WTW [g/Fzkm]	950,38	9.613,87	5.357,03	222,52	19.080,89
THG-Emissionen – Fahrzeug [g/Fzkm]	69,84	198,75	87,36	53,20	12,31
THG-Emissionen – Infrastruktur [g/Fzkm]	4,63	3.585,38	1.270,51	7,30	215,27

Anmerkung: beim Flugzeug werden die TTW-Emissionen über den EWF angepasst

Die spezifischen Emissionen der Verkehrsmittel des Vor-/Nachlaufs sind über die folgende Tabelle gegeben. Vereinfacht werden die Emissionen auf die Verkehrsleistung bezogen. Einflüsse auf die Auslastung werden somit nicht berücksichtigt.

Tabelle 47: Fahrzeugkenngrößen des Vor-/Nachlaufs – „Fernlinienbus“

THG-Emissionen [g CO _{2eq} /Pkm]	Bahn (Fernverkehr)	Bahn (Nahverkehr)	Linienbus (Nahverkehr)	Pkw	Fahrrad
WTW	33,24	58,79	80,54	152,86	0
Fahrzeug	0,69	0,96	6,51	36,54	8,68

THG-Emissionen [g CO _{2eq} /Pkm]	Bahn (Fernverkehr)	Bahn (Nahverkehr)	Linienbus (Nahverkehr)	Pkw	Fahrrad
Infrastruktur	12,39	13,94	1,58	5,01	0,48
Summe	46,32	73,69	88,63	194,41	9,16

4.3.4.3 Methode und Berechnung

Mobilitätskenngrößen

Um die Umweltwirkungen quantifizieren zu können werden die zusätzlichen THG-Emissionen des Fernlinienbusses denjenigen Emissionen gegenübergestellt, die „vermieden“ werden. Als vermiedene Emissionen wird hier verstanden, dass – wenn es keinen Fernlinienbus gäbe – ein Teil der Personentransporte mittels anderer Verkehrsmittel erfolgt wäre. Welche diese im Detail sind ist über die IGES Befragung gegeben. Es werden zwei Fälle differenziert. Im ersten Fall findet eine Anpassung der Fahrleistung der „vermiedenen“ öffentlichen Verkehrsmittel proportional zur Änderung der Verkehrsleistung statt.

Diese Annahme kann als optimistische Abschätzung gewertet werden, da in der Realität im Jahr 2017 und in den Folgejahren weder ein Rückgang in der Verkehrsleistung noch in der Betriebsleistung festgestellt werden konnte. Daher wird ein zweiter Fall definiert. In diesem findet lediglich eine Reduktion der Pkw-Fahrleistung statt. Im Bereich des öffentlichen Verkehrs wird lediglich von einer Änderung der Auslastung ausgegangen. Das Verkehrsaufkommen des Fernlinienbus sowie der „vermiedenen“ Verkehrsmittel sind in der folgenden Tabelle gegeben. Es wird vereinfacht angenommen, dass sich die zurückgelegten Distanzen für einen Personentransport nicht unterscheiden. Demnach kann hieraus die Verkehrsleistung bestimmt werden.

Tabelle 48: „Verlagerte“ Verkehrsmengen auf den Fernlinienbus

	Verlagerte Fahrten	Aufkommen [Mio. Fahrten]	Verkehrsleistung [Mio. Pkm]
Fernlinienbus	+100 %	+16,80	+4.647
Bahn (FV)	-30 %	-5,04	-1.394
Bahn (NV)	-14 %	-2,35	-651
Pkw (Fahrer)	-15 %	-2,52	-697
Pkw (Mitfahrer ohne Bezahlung)	-4 %	-0,67	-186
Pkw (Mitfahrer mit Bezahlung)	-19 %	-3,19	-883
Flugzeug	-4 %	-0,67	-186

Berechnung der Umweltwirkungen

Anhand des Aufkommens können die Emissionen des Vor-/Nachlaufs abgeschätzt werden. Es wird angenommen, dass sowohl im Vor- als auch im Nachlauf dieselben Verkehrsmittel mit denselben Distanzen genommen werden. Die oben genannten Werte werden demnach mit dem Faktor 2 multipliziert.

Tabelle 49: THG-Emissionen des Vor-/Nachlauf für WTW, Fahrzeug und Infrastruktur

THG-Emissionen [t CO _{2eq}]	Bahn (FV)	Bahn (NV)	ÖPNV (Linienbus)	Pkw	Fahrrad
Fernlinienbus	93	1.040	8.398	10.974	18
Bahn (FV)	/	/	536	3.233	39
Bahn (NV)	/	/	250	1.509	18
Pkw (Fahrer)	/	/	/	/	/
Pkw (Mitfahrer ohne Bezahlung)	/	/	/	/	/
Pkw (Mitfahrer mit Bezahlung)	18	198	1.596	2.085	4
Flugzeug	84	134	447	2.234	/

Anmerkung: Die THG-Emissionen des Fernlinienbusses können über die Fahrleistung bestimmt werden. Bei den „vermiedenen“ Emissionen sind die beiden o. g. Fälle zu unterscheiden. Im ersten Fall kommt es zu einer Reduktion der Fahrleistung bei den öffentlichen Verkehrsmitteln. Im zweiten Fall variieren lediglich die Auslastungen. Emissionen, die aus einem Anstieg des Gewichts durch die höhere Passagierzahl resultieren, werden vernachlässigt. Tabelle 50 und Anmerkung: beim Flugzeug werden die TTW-Emissionen über den EWF angepasst.

Tabelle 51 zeigen die gesamten Klimawirkungen der beiden Fälle.

Tabelle 50: Änderungen der Klimawirkungen des Hauptlaufs – Fall 1

	Auslastung	Fahrleistung [Mio. Fzkm]	Emissionen – WTW [t]	Emissionen – Fahrzeug [t]	Emissionen – Infrastruktur [t]
Fernlinienbus	57,21 %	143,4	136.285	10.016	664
Bahn (FV)	55,63 %	4,8	46.336	958	17.281
Bahn (NV)	27,45 %	7,1	38.247	624	9.071
Pkw	32,38 %	697,1	155.112	37.083	5.087
Flugzeug	72,50 %	2,1	40.069	26	452

Anmerkung: beim Flugzeug werden die TTW-Emissionen über den EWF angepasst

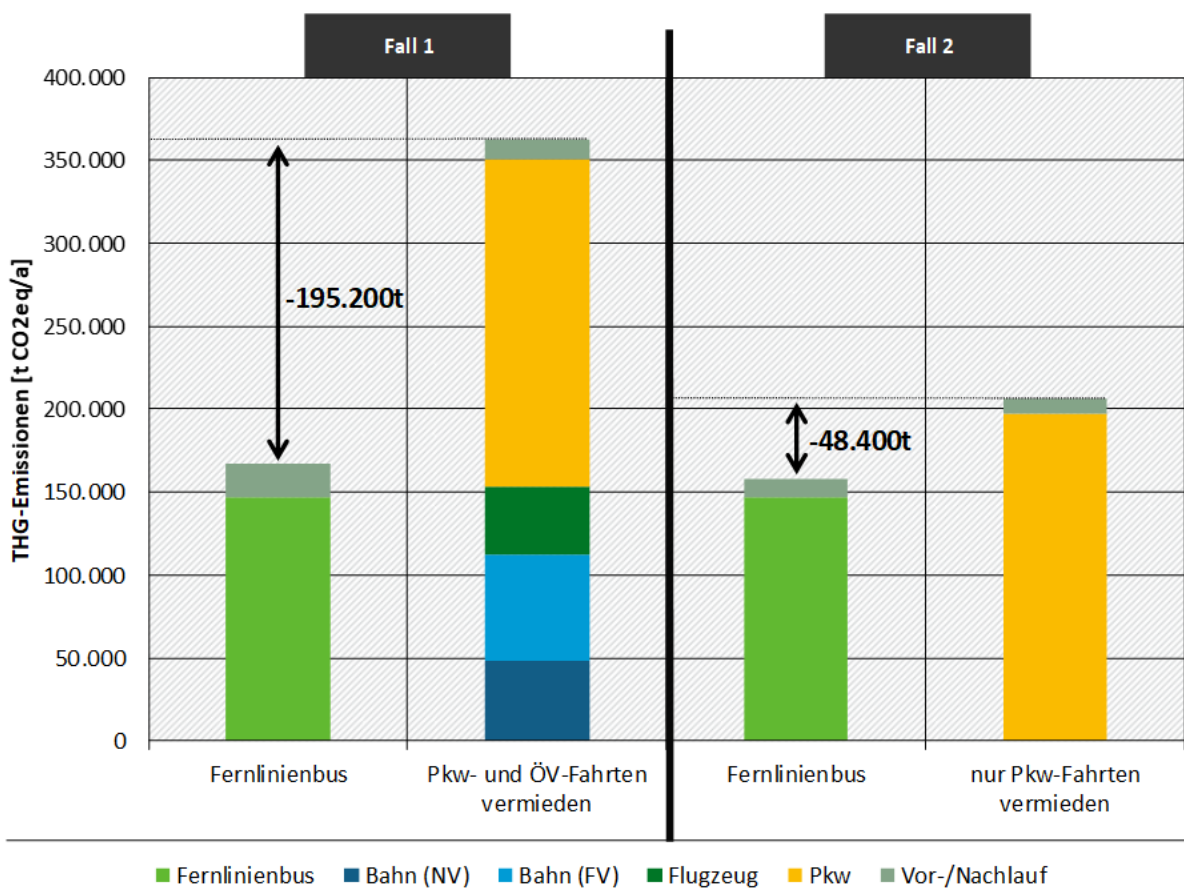
Tabelle 51: Änderungen der THG-Emissionen des Hauptlaufs – Fall 2

	Auslastung	Fahrleistung [Mio. Fzkm]	Emissionen – WTW [t]	Emissionen – Fahrzeug [t]	Emissionen – Infrastruktur [t]
Fernlinienbus	57,21 %	143,4	136.285	10.016	664
Bahn (FV)	57,55 %	unverändert	0	0	0
Bahn (NV)	27,78 %	unverändert	0	0	0
Pkw	32,38 %	697,1	155.112	37.083	5.087
Flugzeug	71,12 %	unverändert	0	0	0

Anmerkung: beim Flugzeug werden die TTW-Emissionen über den EWF angepasst

In Abbildung 51 sind die zusätzlichen THG-Emissionen, die durch den Fernlinienbus entstehen und die „vermiedenen“ Emissionen durch die Verlagerung für beide Fälle dargestellt. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die zusätzlichen Emissionen geringer sind als die vermiedenen Emissionen. In Fall 1, bei dem die Betriebsleistung des ÖV angepasst wird, summieren sich die vermiedenen THG-Emissionen zu 362.700 t CO_{2eq} pro Jahr. Abzüglich der 167.500 t durch den Fernlinienbus ergeben sich hohe Einsparungen in Höhe von ca. 195.200 t. Wird demgegenüber nur angenommen, dass Pkw-Fahrten (und Fahrradfahrten) im Haupt- und Nebenlauf vermieden werden und keine Anpassung des Angebots beim ÖV erfolgt, so ergeben sich zusätzliche Emissionen beim Fernlinienbus von 158.000 t und vermiedene Emissionen von 206.400 t. Hieraus resultieren Einsparungen im Bereich von rund 48.400 t. Beide Fälle weisen demnach eine positive THG-Bilanz auf.

Abbildung 51: Zusätzliche THG-Emissionen durch den Fernlinienbus und vermiedene Emissionen durch Verlagerung



Quelle: eigene Berechnung; Anmerkungen: THG-Emissionen = Emissionen für WTW, Fahrzeug und Infrastruktur, Klimawirkung des Flugzeugs unter Berücksichtigung des EWF

4.3.4.4 Diskussion und Fazit

Die ermittelten THG-Emissionen weisen darauf hin, dass die Liberalisierung des Fernlinienbusmarktes netto eine positive Umweltwirkung hatte. Die ermittelte Bandbreite der THG-Reduktion liegt hierbei zwischen 48.400 und 195.200 t CO_{2eq} pro Jahr. Bei der Betrachtung gibt es jedoch auch einige Randbedingungen und Annahmen, die kritisch zu hinterfragen sind. Die Vernachlässigung des induzierten Verkehrs abseits des Fernlinienbusses kann zu einem Fehler führen, da durch den gestiegenen Wettbewerb die Preise für Bahnfahrten im Fernverkehr gesunken sind. Dies kann wiederum einen Teil des Anstiegs des beobachteten

Verkehrsaufkommens bei der Bahn erklären. Hieraus können zusätzliche THG-Emissionen entstehen, die außerhalb der Betrachtung liegen.

Des Weiteren ist die Befragung auf der die ermittelte Verlagerung besteht lediglich eine Momentaufnahme. Ob die Aussage, dass der Fernlinienbus einen positiven Effekt hatte für den gesamten Zeitraum ab der Liberalisierung Gültigkeit hat, kann nicht abschließend geklärt werden. Eine mögliche Fehlerquelle resultiert ebenfalls aus den angenommenen Reisedistanzen. Für die verlagerten Personenfahrten wird unabhängig vom betrachteten Verkehrsmittel die durchschnittliche Fahrweite des Fernlinienbusses angesetzt. Dies ist jedoch eine Vereinfachung, da die Personen, die nun den Fernlinienbus statt des Flugzeugs nutzen, wahrscheinlich deutlich weitere Distanzen zurückgelegt hätten als Personen, die vom Regionalzug auf den Fernlinienbus umgestiegen sind. Eine Berücksichtigung dieses Einflussfaktors könnte die ermittelten Vermeidungspotenziale erhöhen.

Zudem werden dieselben Umwegfaktoren für jedes Verkehrsmittel angesetzt, obwohl sich diese – z. B. Bahn verglichen mit dem Flugzeug – deutlich unterscheiden können. Auf einigen Relationen legt der Fernlinienbus oftmals eine kürzere Distanz zurück als die Bahn, wogegen das Flugzeug auf vielen Relationen die kürzeste Distanz aufweist. Nichtsdestoweniger kann der Betrachtungsfall ein Indiz dafür geben, dass die Liberalisierung des Fernlinienbusmarktes trotz des zusätzlichen Verkehrs durchaus einen positiven Umwelteffekt gehabt haben kann.

4.3.5 Einführung von stationslosen E-Tretroller-Leihsystemen

4.3.5.1 Untersuchungsrahmen und Zielsetzung

Das Ziel der Untersuchung ist eine erste Sichtung über die Auswirkungen der Einführung von stationslosen E-Tretroller Leihsystemen in deutschen Großstädten, am Beispiel von Berlin. Aufgrund des neuartigen Einsatzes von E-Tretrollern werden die fahrzeugseitigen Eigenschaften in einem ersten Schritt ausführlich betrachtet. In verschiedenen Fällen sollen Sensitivitäten von Nutzungsmustern, Lebensdauern und Aufladefahrten untersucht werden. Im zweiten Teil der Analyse folgt dann die Betrachtung der Verlagerung auf E-Tretroller in verschiedenen Szenarien.

Die zentrale Fragestellung lautet:

Welche Umweltwirkungen kann die Einführung von stationslosen E- Tretroller Leihsystemen in deutschen Großstädten haben (am Beispiel von Berlin).

Im Folgenden werden kurz die Randbedingungen für die Analyse in Stichpunkten festgehalten:

- ▶ Auftraggeber ist das Umweltbundesamt (UBA), die Zielgruppe ist die interessierte Öffentlichkeit und die Analyse wird erstellt vom ifeu.
- ▶ Betrachtet wird der Verkehr in Metropolen in Deutschland, beispielhaft hier in Berlin.
- ▶ Der Fokus liegt auf den Treibhausgasemissionen (über den gesamten Lebenszyklus, exklusive Infrastrukturbereitstellung) sowie den direkten Luftschadstoffen PM_{2.5} und NO_x (nur TTW).
- ▶ Bezugsgröße sind die jährlich von den Tretrollern verursachten Emissionen

Bei der Analyse wird lediglich das Verkehrsaufkommen eines Jahres betrachtet ohne künftige Entwicklungen zu berücksichtigen. Nutzungsdaten beziehen sich dabei auf das Einführungsjahr 2019. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass aus mangelnder Aktualität der Daten für einige Berechnungen auf Daten aus anderen Jahren zurückgegriffen wird.

Gegenstand dieser Untersuchung sind Tretroller ohne Sitz und mit Lenkstange, welche unter die Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung (eKFV) fallen. Diese dürfen nicht schneller als 20 km/h fahren (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2019). Dabei werden in dieser Betrachtung nur E-Tretroller von stationslosen Leihsystemen betrachtet, private E-Tretroller können deutlich andere Umweltwirkungen aufweisen. Für diese Untersuchung wird angenommen, dass die Leih-Tretroller am Ende jedes Tages eingesammelt werden, um sie aufzuladen.

Zudem wird untersucht welche Verkehrsmittel E-Tretrollernutzer vorher verwendet haben, um mögliche Auswirkungen zu beziffern. Hierbei können sich unterschiedliche Kombinationen an Verkehrsmitteln als Teile einer Wegeketten ergeben. Für den ÖPNV werden vereinfacht die bundesdeutschen Durchschnittswerte angesetzt. Im Folgenden ist eine Übersicht über betroffene Verkehrsmittel, Transportarten und Distanzklassen gegeben:

- ▶ *Transportart:* Personenverkehr
- ▶ *Distanzklasse:* Nahverkehr in Agglomerationen
- ▶ *Verkehrsmittel:* ÖPNV (Linienbus, SSU), Fahrrad, Pkw, E- Tretroller

4.3.5.2 Datengrundlage und -beschaffung

Fahrzeugkenngrößen

Es liegen bisher nur wenige Daten über die Nutzung von E-Tretrollern seit der gesetzlichen Einführung im Juni 2019 vor. Daten zu Flottengrößen und Nutzungsverhalten von E-Tretrollern in 27 deutschen Städten wurden von der Consulting Firma Civity über einen Zeitraum von sechs Wochen erhoben. Die in (civity, 2019) gezeigten Anbieter haben Schnittstellen (APIs) über die in regelmäßigen Abständen die Positionen der E-Tretroller je Stadt abgefragt wurden. Aus den Positionsdaten wurden dann Bewegungen je E-Tretroller ermittelt. Insgesamt ist eine Flotte von ca. 62.500 E-Tretrollern in diesen Städten unterwegs (Stand September 2019). Im Vergleich zu den erhobenen Daten vom Juli weisen die Ergebnisse bereits ein starkes Wachstum und eine Ausweitung des Konzeptes auf weitere Städte aus. In Berlin waren im Juli noch ca. 4.400 Roller zu verzeichnen, im September kommt die Analyse auf ca. 11.000 Roller in der Hauptstadt. Die erhobenen Rollerdaten decken die Anbietern LIME, Tier und VOI ab (civity, 2019). Ausführliche Analysen des Lebenszyklus (Ökobilanz) von E-Tretrollern existieren nur vereinzelt, z. B. (Hollingsworth et al., 2019) und (Chester, 2019).

Tabelle 52 gibt eine Übersicht über die gegebenen Daten.

Tabelle 52: Fahrzeugkenngrößen für E-Tretroller

E- Tretroller	Wert	Quelle
Verbrauch [kWh/Fzkm]	0,01	https://shop.bird.co/
Lebensdauer [Monate]	3-18	(Umweltbundesamt, 2019b) (Baumann, 2019)
Emissionen aus Produktion und Entsorgung [kg CO _{2eq} /Roller]	178,08	(Hollingsworth et al., 2019)

E- Tretroller	Wert	Quelle
Distibutionswegelänge [km] und -fahrzeuge	1-4 km pro Roller per Lieferwagen, Lastenfahrrad oder Pkw	(Gubmann et al., 2019), (Hollingsworth et al., 2019)
Fahrtenanzahl Berlin [Fahrten/Roller/Tag]	2,97	(civity, 2019)
tägliche Laufleistung [km/Roller/Tag]	5,35	eigene Berechnung für Berlin, auf Basis von (civity, 2019)
jährliche Laufleistung [km/Roller/Jahr]	1.952	eigene Berechnung für Berlin, auf Basis von (civity, 2019)
Flotte Berlin [Roller]	11.091	(civity, 2019)
jährliche Fahrten der Flotte [Fahrten/Flotte/Jahr]	12.009.705	eigene Berechnung

Die durchschnittlichen Distanzen (für die Fahrzeuge der Anbieter TIER, VOI und Lime) gewichtet nach der Anzahl der Roller ergibt einen Mittelwert von ca. 1,80 km pro Fahrt (civity, 2019). Der Emissionsfaktor für den Strom beträgt 552 g CO_{2eq}/kWh. Die folgende Tabelle zeigt die THG-Emissionsfaktoren (WTW und Fahrzeug) und die direkten NO_x-Emissionen für die weiteren Verkehrsmittel. Verwendet werden die Emissionen für den Innerortsbetrieb.

Tabelle 53: THG-, direkte NO_x- und direkte PM_{2,5}-Emissionsfaktoren der weiteren Verkehrsmittel (innerorts)

Verkehrsmittel/ Annahme	THG (WTW und Fahrzeug)	NO _x (TTW)	PM _{2,5} (TTW)
Pkw	221,8 g CO _{2eq} /Pkm	0,441 g NO _x /Pkm	5,30 mg PM _{2,5} /Pkm
LNF	364,3 g CO _{2eq} /Fzkm	1,221 g NO _x /Fzkm	43,93 mg PM _{2,5} /Fzkm
ÖPNV*	105,0 g CO _{2eq} /Pkm	0,497 g NO _x /Pkm	2,24 mg PM _{2,5} /Pkm
Lastenrad	22,4 g CO _{2eq} /Fzkm	/	/
Fahrrad	8,7 kg CO _{2eq} /Pkm	/	/

Anmerkung: *Bundesweiter Durchschnitt für SSU und Nahlinienbusse

Verkehrsseitige Angaben

Bezüglich der Verlagerungen gibt es erste Befragungen, die verschiedene Ergebnisse liefern. Tabelle 54 zeigt eine Übersicht über Verlagerungspotentiale aus den unterschiedlichen Quellen. Auffallend hierbei ist, dass die Verlagerung vom Pkw auf E-Roller örtlich deutlich variiert zwischen den Ergebnissen aus Frankreich und den USA.

Tabelle 54: Angaben zu Verlagerungen durch E-Tretroller

Verlagerung/Stadt	Frankreich Paris, Lyon, Marseille	USA San Francisco	USA Portland	USA Raleigh, North Carolina
Fußgänger	47 %	31 %	37 %	41 %
ÖPNV	29 %	11 %	ca. 10 %	11 %
Fahrrad	9 %	9 %	5 %	7 %
MiV	10 %*	42 %	34 %	34 %
Quelle	(Krier et al., 2019)	(SFMTA, 2019)	(Krier et al., 2019)	(Hollingsworth et al., 2019)

Anmerkung: *setzt sich hier zusammen aus Pkw, Taxi und (elektrischen) Krafträdern

4.3.5.3 Methode und Berechnung

Fahrzeugkenngrößen

Die Fahrzeugkenngrößen von E-Tretrollern hängen stark von Lebensdauer, Fahrleistung und den Distributionsfahrten ab (Hollingsworth et al., 2019). Da der Einfluss der Emissionen aus der Herstellung mit zunehmender Lebensdauer der Roller sinkt, ist eine Betrachtung verschiedener Fälle hier angebracht. In der Analyse soll zuerst von der höchsten Lebensdauer von 18 Monaten ausgegangen werden. Weitere Sensitivitätsanalysen mit einer mittleren Lebensdauer von 12 Monaten und 9 Monaten sollen die Spannweite an Ergebnissen zeigen.

Des Weiteren fallen besonders die notwendigen Distributionsfahrten für das nächtliche Laden der Roller in der Nutzungsphase ins Gewicht (Hollingsworth et al., 2019). Das eingesetzte Fahrzeug und die zurückgelegte Distanz sind dabei ausschlaggebend. In der Literatur finden sich für die zurückgelegte Distanz verschiedene Werte. Erfahrungen aus den USA belegen, dass zwischen ca. einem und vier Kilometern pro Roller an Distributionsfahrten anfallen können (Hollingsworth et al., 2019), (Gubmann et al., 2019). Außerdem gibt es verschiedene Systeme für die Distributionsfahrten.

Das Unternehmen Lime setzt sogenannte „Juicer“, also Privatpersonen mit eigenem Pkw oder eigens angemietetem Transporter ein, die die leeren Roller einsammeln und bei sich zu Hause über Nacht laden. Tier hingegen engagiert eigene Mitarbeiter für das Einsammeln und bringt die Roller in Ladezentren. Diese liegen teilweise dezentral, wie in Berlin Spandau (rbb24, 2019), (München.de, 2019), (Tagesspiegel, 2019). In diesem Zusammenhang sind längere Ladefahrten von vier Kilometern im Geschäftsgebiet durchaus denkbar. Da aber auch geringere Distanzen wahrscheinlich erscheinen, da sich die Roller vermehrt in Innenstädten an zentralen Punkten wie S-Bahnhöfen etc. ansammeln, wird eine Analyse für die Extremwerte von vier Kilometern und einem Kilometer angesetzt. Bei der Fahrzeugwahl der „Juicer“ wird im besten Fall der Einsatz von Lastenfahrrädern angenommen, im schlechtesten Fall der von leichten Nutzfahrzeugen (LNF). Die betrachteten Fälle sind in Tabelle 55 gezeigt.

Tabelle 55: Betrachtete Fälle in der Lebenszyklusanalyse (Angabe für Berlin)

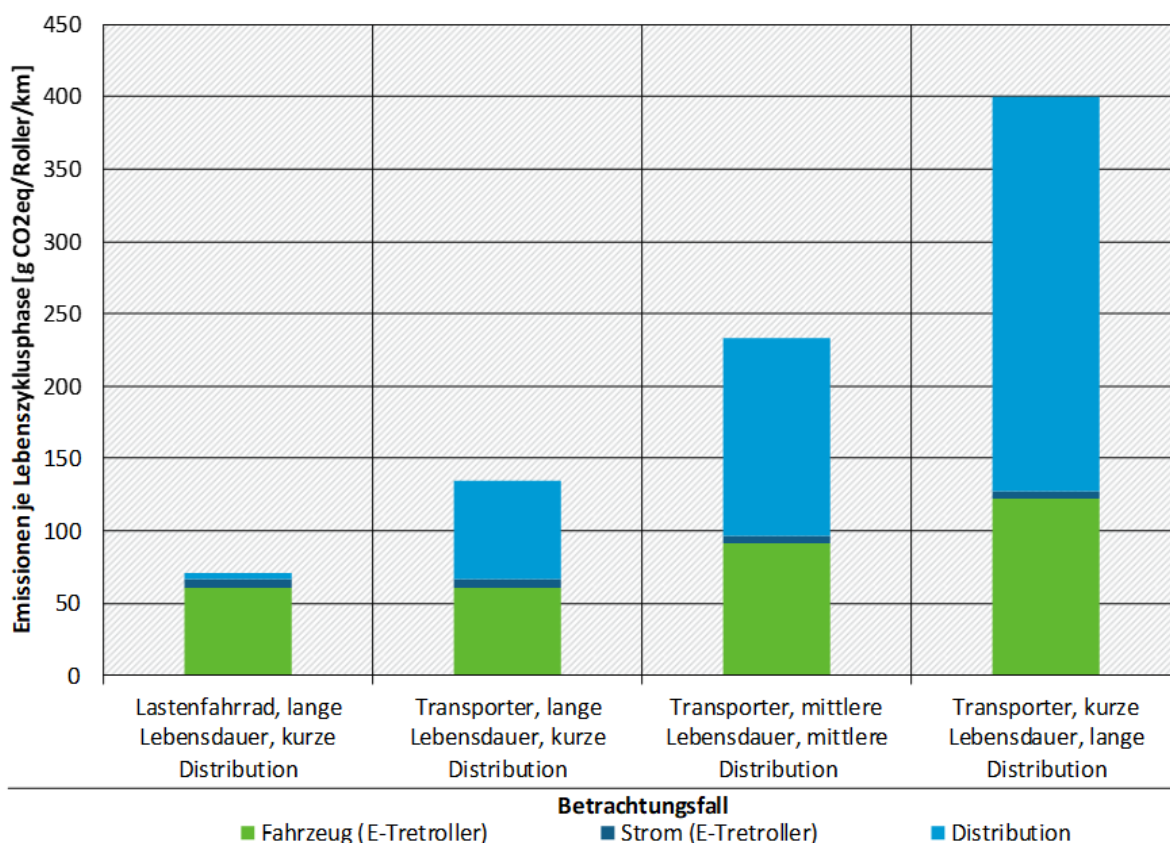
Betrachtete r Fall/ Annahme	Lastenfahrrad, lange Lebensdauer, kurze Distribution	Transporter, lange Lebensdauer, kurze Distribution	Transporter, mittlere Lebensdauer, mittlere Distribution	Transporter, kurze Lebensdauer, lange Distribution	Quelle
Lebensdauer [Monate]	18	18	12	9	(Umweltbundesamt, 2019b) (Baumann, 2019)
Lebensfahrleistung [km]	2.929	2.929	1.952	1.464	eigene Berechnung anhand der Tagesfahrweiten
Distributionsfahrzeug	Lastenfahrrad	Lieferwagen	Lieferwagen	Lieferwagen	Annahme
Distributionsweg [km]	1	1	2	4	Annahme

Die Treibhausgasemissionen der E-Tretroller pro Personenkilometer (inkl. Distributionsfahrten, aber ohne Infrastrukturaufwendungen) ergeben sich demnach wie folgt:

$$Emissionen = \frac{Emissionen_{Fahrzeug}}{Lebensdauer \cdot Jahresfahrleistung} + Verbrauch \cdot EFA_{Strom} + \frac{Distributionswegelänge \cdot EFA_{Distributionsfahrzeug}}{tägliche Fahrleistung}$$

Nach dem oben genannten Vorgehen wurde das Treibhausgaspotential in CO_{2eq} berechnet. Es gibt dabei eine große Bandbreite zwischen 71 und 400 g CO_{2eq} pro Rollerkilometer in den Extremfällen, wie Abbildung 52 anschaulich zeigt. Der Abgleich mit anderen Studien ergibt ähnliche Bandbreiten und Sensitivitäten (Hollingsworth et al., 2019)/(Chester, 2019).

Abbildung 52: Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse E-Tretroller in Berlin



Quelle: eigene Berechnungen, Datengrundlage siehe Tabelle 55

Tabelle 56 zeigt die Betrachtungsfälle der E-Tretroller im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln. Daraus geht hervor, dass sich der Tretroller im besten Fall in einer gleichen Größenordnung bezüglich der THG-Emissionen (WTW und Fahrzeug) befindet wie der ÖPNV. Das Pedelec schneidet trotz relativ ähnlicher direkter Stromverbräuche deutlich besser ab. Gründe hierfür sind die hohe Lebensfahrleistung der Pedelecs (25.000 km), sowie die bei E-Tretroller anfallenden Distributionsfahrten.

Tabelle 56: Emissionsfaktoren von E-Tretroller (in Berlin)

Verkehrsmittel	Annahme	THG [g CO _{2eq} /Pkm]	NO _x [mg/Pkm]	PM _{2.5} [mg/Pkm]
E-Tretroller	Lastenfahrrad, lange Lebensdauer, kurze Distribution	70,5	0	0
	Lieferwagen, lange Lebensdauer, kurze Distribution	134,4	228	8
	Lieferwagen, mittlere Distribution und Lebensdauer	232,9	456	16
	Lieferwagen, kurze Lebensdauer und lange Distribution	399,5	913	33
Fahrrad		8,7	0	0

Verkehrsmittel	Annahme	THG [g CO _{2eq} /Pkm]	NO _x [mg/Pkm]	PM _{2.5} [mg/Pkm]
Pedelec		14,5	0	0
Pkw		221,8	600	5
ÖPNV		81,4	210	2

Anmerkung: Emissionen beinhalten die WTW- und Fahrzeug-Emissionen. Bei den E-Tretrollern werden zusätzlich die Distributionsfahrten. Bei den NO_x- und PM_{2.5}-Emissionen werden nur die TTW-Emissionen berücksichtigt. Die Emissionen sind für den Innerortsbetrieb.

Verkehrsseitige Größen

Die aktuelle Verkehrsleistung ist in Tabelle 52 und verschiedene Studien zum Verlagerungspotential in Tabelle 57 zu sehen. Da das Verlagerungspotential aus unterschiedlichen Studien sehr variiert, werden hier zuerst zwei Extremfälle betrachtet.

Im ersten Fall „Ersatz Pkw-Fahrten durch ÖPNV und E-Tretroller“ wird davon ausgegangen, dass die Rollerfahrer vom Pkw auf den öffentlichen Nahverkehr umsteigen und für die letzte Meile den Roller nutzen. Die durchschnittlichen Distanzen für den Pkw entsprechen den MiT-Daten für Metropolen gewichtet nach dem Anteil von Fahrern und Beifahrern. Diese beträgt 18,26 km (MiT, 2017). Die Wegelänge, die mit dem ÖPNV zurückgelegt wird, wird über die folgende Gleichung ermittelt:

$$Wegelänge_{\text{ÖPNV}} = Wegelänge_{\text{Pkw}} - Wegelänge_{\text{E-Tretroller}} = 18,26 \text{ km} - 1,8 \text{ km} = 16,46 \text{ km}$$

Im Fall „Induzierter Verkehr“ wird eine Verlagerung von Fußgängern auf E-Tretroller betrachtet, was in diesem Fall auch gleichzusetzen ist mit induziertem Verkehr, da Fußgänger mit einem Emissionsfaktor von null angesetzt werden.

Im Fall „Umfrageergebnisse“ werden die prozentualen Verlagerungen aus Tabelle 57 verwendet. Es wird angenommen, dass kurze Pkw- und ÖPNV-Fahrten mit einer Länge von je 1,8 km durch E-Tretroller ersetzt werden. Hauptsächlich wird jedoch Fußgängerverkehr und öffentlicher Nahverkehr für kurze Strecken ersetzt. Die Berechnungen werden analog zum vorherigen Muster angewendet.

Bezüglich der Änderung der Fahrzeugkenngrößen wird angenommen, dass die Auslastung konstant bleibt und die Fahrleistung proportional zur Verkehrsleistung steigt.

Tabelle 57: Zentrale Annahmen Fallunterscheidung E-Tretroller

Fall/ Annahme	Ersatz Pkw-Fahrten durch ÖPNV und E- Tretroller	Induzierter Verkehr	Umfrageergebnisse	Quelle
Verlagerung	Pkw auf E-Tretroller und ÖPNV	Umstieg Fußgänger auf E-Tretroller	Modal Split nach Umfrageergebnissen aus Frankreich	
Verlagerungs- umfang	100 %	100 %	Fußgänger: 47 % ÖPNV: 29 % Radverkehr: 9 % Pkw: 10 %	(Krier et al., 2019)
Wegelänge der verlagerten Fahrten	Pkw: 18,26 km	zu Fuß: 1,8 km	Pkw, Bus, zu Fuß, Fahrrad: je 1,8 km	(MiT, 2017)

Fall/ Annahme	Ersatz Pkw-Fahrten durch ÖPNV und E- Tretroller	Induzierter Verkehr	Umfrageergebnisse	Quelle
Wegelänge der hinzukommende n Fahrten	ÖPNV: 16,46 km E-Tretroller: 1,8 km	E-Tretroller: 1,8 km	E-Tretroller: 1,8 km	
verlagerte Personenfahrten pro Jahr	Pkw: 12.009.705	Fußgänger: 12.009.705	Fußgänger: 5.644.561 ÖPNV: 3.482.814 Radverkehr: 1.080.873 Pkw: 1.200.970	
zusätzliche Personenfahrten pro Jahr	ÖPNV: 12.009.705 E-Tretroller: 12.009.705	E-Tretroller: 12.009.705	E-Tretroller: 12.009.705	

Berechnung der Umweltwirkungen

Für weitere Berechnungen werden die Angaben aus dem mittleren Fall (Lieferwagen, mittlere Distribution und Lebensdauer) der E-Tretroller Umweltbewertung von rund 232,9 g CO_{2eq} angenommen. Für die restlichen Verkehrsmittel werden bezüglich der Treibhausgasemissionen die WTW-Emissionen sowie den Fahrzeugemissionen berücksichtigt, wogegen bei den Luftschadstoffen lediglich mit den TTW-Emissionen gerechnet wird. Die verwendeten Emissionsfaktoren gelten für den Innerortsbetrieb.

Sowohl die vermiedenen als auch die zusätzlichen jährlichen Emissionen ergeben sich für die jeweiligen Verkehrsmittel wie folgt:

$$Emissionen = Personenfahrten \cdot Wegelänge \cdot Emissionsfaktor$$

Die Differenz aus den vermiedenen und den zusätzlichen Emissionen ergibt das mögliche Einsparpotenzial.

Tabelle 58 zeigt eine Übersicht der THG-Einsparungspotentiale der drei Fälle unter Berücksichtigung der mittleren Emissionsfaktoren für das E-Tretroller-System (Lieferwagen, mittlere Distribution und Lebensdauer). Zusätzlich wird in Abbildung 53 die Bandbreite der gesamten THG-Emissionen angegeben, die sich bei der Berücksichtigung der anderen Emissionsfaktoren für den E-Tretroller ergeben. Hier ist zu sehen, dass sich ein Einsparungspotential von ca. 27.514 t CO_{2eq} pro Jahr bei einem Umstieg von Pkw auf ÖPNV und E-Tretroller ergibt. Bei den Luftschadstoffen fällt das Einsparpotential durch den Umstieg auf ÖPNV und E-Tretroller geringer aus, da ein Großteil der Strecke immer noch mit dem ÖPNV zurückgelegt wird. Der rein induzierte Verkehr führt zu Mehremissionen von 5.036 t CO_{2eq} pro Jahr. Nach Betrachtung der Umfrageergebnisse, bei denen hauptsächlich Fußgänger und ÖPNV-Nutzern umsteigen, entstehen zusätzliche Emissionen von 4.029 t CO_{2eq} pro Jahr. Auch bei den Luftschadstoffen steigen in den beiden letzten Fällen durch die Einführung der E-Tretroller die lokalen Emissionen an. Dies ist auf die Distribution der Roller zurückzuführen, siehe Tabelle 59.

Abbildung 53: Bandbreite der Klimawirkung von E-Tretrollern in Berlin

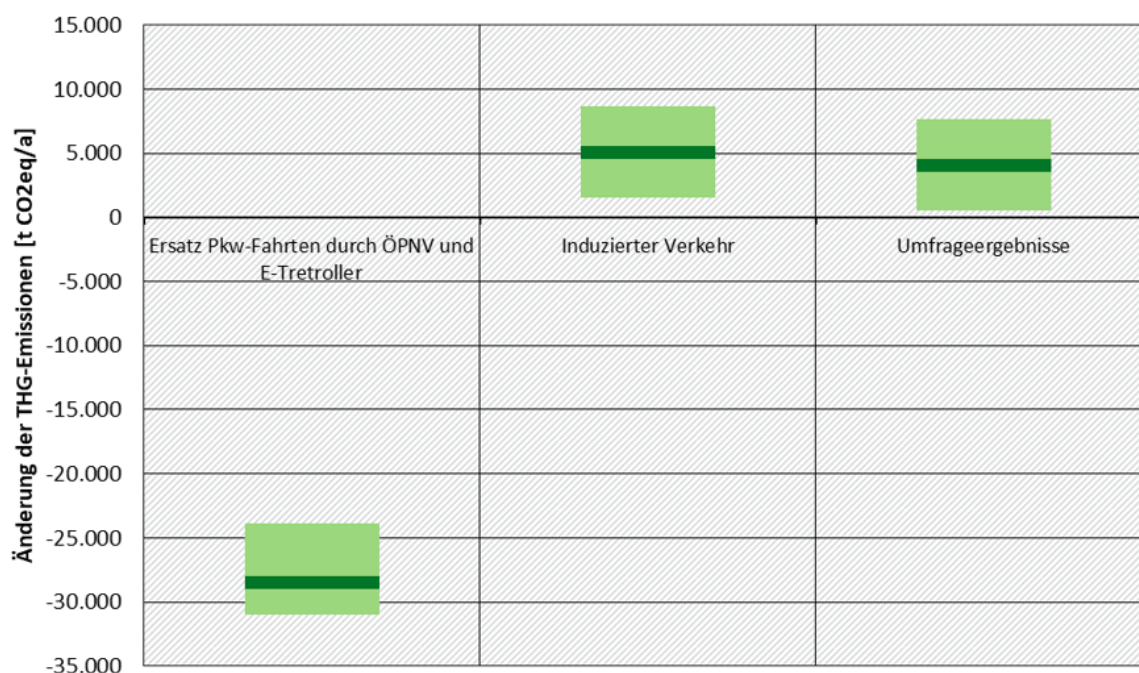


Tabelle 58: Klimawirkungen E-Tretroller in Berlin

Szenarien/Emissionen [t CO ₂ eq/Jahr]	Vermiedene Emissionen	Zusätzliche Emissionen ÖPNV	Zusätzliche Emissionen E-Tretroller	Differenz
Ersatz Pkw Fahrten durch ÖPNV und E-Tretroller	48.643	16.093	5.036	-27.514
induzierter Verkehr	0	0	5.036	5.036
Umfrageergebnisse	1.007	0	5.036	4.029

Tabelle 59: Luftschadstoffe E-Tretroller in Berlin

Szenarien/Emissionen	Vermiedene Emissionen	Zusätzliche Emissionen ÖPNV	Zusätzliche Emissionen E-Tretroller*	Differenz
Ersatz Pkw-Fahrten durch ÖPNV und E-Tretroller	131,49 t NO _x /a	41,58 t NO _x /a	9,87 t NO _x /a	-80,04 t NO _x /a
	1.161 kg PM _{2,5} /a	443 kg PM _{2,5} /a	355 kg PM _{2,5} /a	-363 kg PM _{2,5} /a
induzierter Verkehr	0	0	9,87 t NO _x /a	+9,87 t NO _x /a
	0	0	355 kg PM _{2,5} /a	+355 kg PM _{2,5} /a
Umfrageergebnisse	2,61 t NO _x /a	0	9,87 t NO _x /a	+7,25 t NO _x /a
	26 kg PM _{2,5} /a	0	355 kg PM _{2,5} /a	+329 kg PM _{2,5} /a

Anmerkung: *direkte städtische Schadstoffemissionen entstehen durch die Distributionswege mit dem LNF

4.3.5.4 Auswertung und Diskussion

Ziel dieser Analyse ist eine erste Sichtung der potentiellen Klimaauswirkungen der Einführung von stationslosen E- Tretroller Leihsystemen in deutschen Großstädten, am Beispiel von Berlin. Das Ergebnis der Analyse zeigt eine große Bandbreite an Ergebnissen bei den spezifischen Emissionen der E-Tretroller. Eine präzise Einordnung ist daher nicht möglich.

Ergebnisbeeinflussend sind hier vor allem die Lebensdauer, Distributionsfahrten und die tägliche Laufleistung. Zu keiner der drei Variablen gibt es bis heute verlässliche Durchschnittskennzahlen. Die ermittelten spezifischen THG-Emissionsfaktoren liegen im Bereich von 71-400 g CO_{2eq}/ Pkm. Demnach könnte der Wert unter günstigen Randbedingungen durchaus im Bereich des ÖPNV liegen, wogegen im Extremfall auch um 80 % höher spezifische THG-Emissionen entstehen könnten als beim Pkw.

Besonders die Laufleistung variiert zwischen ersten Erhebungen im Juli und aktuellsten Daten über einen Zeitraum im August und September stark. Aus früheren Ergebnissen der Erhebung von Civity war eine doppelt so hohe tägliche Laufleistung der E-Tretroller in Berlin hervorgegangen. Die spezifischen Emissionen mit einer hohen Laufleistung betragen nur rund die Hälfte pro gefahrenen Kilometer. Alle betrachteten Städte aus der vorherigen Studie weisen ebenfalls einen deutlichen Rückgang der täglichen Fahrtenanzahl auf. Diese Entwicklung zeigt, wie unverlässlich die bisher vorhandenen Daten sind und wie sehr sie das Ergebnis beeinflussen.

Zukünftige Langzeitstudien könnten hier sichere Ergebnisse liefern. Civity selbst weist darauf hin, dass Ungenauigkeiten in der Messmethodik mit GPS-Daten vorliegen können. Außerdem sind Distributionsfahrten und Nutzerfahrten nicht zu unterscheiden (civity, 2019). Weitere Einschränkungen ergeben sich aus den verwendeten Ökobilanzdaten. Hier wurde auf vorhandene Datensätze aufgebaut und diese beschränken sich auf die dort getroffenen Annahmen.

Bezüglich der Verlagerungspotentiale gibt es ebenfalls eine große Bandbreite an möglichen Ergebnissen. Der reine Umstieg vom Pkw auf ÖPNV und E-Tretroller lassen auf Einsparpotentiale in Berlin von ca. 27.500 t CO_{2eq} pro Jahr schließen. Hingegen würden durch einen Umstieg von Fußgängern zusätzliche Emissionen von rund 5.000 t pro Jahr entstehen. Umfrageergebnisse aus den USA und Frankreich geben ein ebenfalls uneinheitliches Bild über mögliche Umstiege wieder.

Problematisch sind zudem einige nicht quantifizierte Auswirkungen wie zum Beispiel die steigende Attraktivität der Rollernutzung für Geschäftsleute. Um genaue Aussagen treffen zu können, fehlen hier repräsentative Studien über einen möglichen Umstieg zwischen den Verkehrsmitteln.

Bei den Luftschadstoffen ergibt sich ein niedrigeres Einsparpotential beim Ersatz von Pkw-Fahrten von 80 t NO_x pro Jahr und 363 kg PM_{2,5} pro Jahr. Der induzierte Verkehr schlägt mit 9,9 t NO_x und 355 kg PM_{2,5} zusätzlicher Belastung pro Jahr zu Buche. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass zur Vereinfachung mit einem bundesdeutschen Durchschnitt (innerorts) gerechnet wurde. Auch die Wahl der Emissionsfaktoren des E-Tretrollers ist hier als große Unsicherheit zu erachten. Für die Minderungspotenziale wurden die Durchschnittsfaktoren verwendet. Jedoch weisen diese eine wie oben erwähnt hohe Bandbreite auf, die das Ergebnis deutlich ändern könnten.

Insgesamt kann man feststellen, dass E-Tretroller aus Leihsystemen als Zubringer zu öffentlichen Verkehrsmitteln sinnvoll sein können, jedoch momentan noch anders genutzt werden. Als Hebel für eine positive Bilanz wurden die Distributionsfahrten, die Fahrleistung und

der Umstieg von Pkw-Fahrern identifiziert. Zukünftig wären auch die private Nutzung und die daraus entstehenden Umweltwirkungen zu betrachten.

4.3.6 Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein

4.3.6.1 Untersuchungsrahmen und Zielsetzung

Ziel der Analyse ist die Abschätzung der Umweltwirkung durch den Ausbau des Schienenpersonennahverkehrs (SPNV) in Schleswig-Holstein. Die zentrale Fragestellung lautet:

Welche Systemwirkungen resultierten aus der Angebotsausweitung des SPNVs in Schleswig-Holstein zwischen den Jahren 2006 und 2016?

Im Folgenden werden kurz die Randbedingungen für die Analyse in Stichpunkten festgehalten:

- ▶ Auftraggeber ist das Umweltbundesamt (UBA), die Zielgruppe ist die interessierte Öffentlichkeit und die Analyse wird erstellt vom ifeu.
- ▶ Betrachtet wird der Schienen-Personenverkehr in Schleswig-Holstein in den Jahren 2006 und 2016.
- ▶ Der Fokus liegt auf der Entwicklung der jährlichen Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus im Betrachtungszeitraum.
- ▶ Betrachtungsgröße sind die jährlichen Emissionsänderungen, die aus einer möglichen alternativen Entwicklung ohne Ausweitung des Angebots im SPNV resultiert wären.

Bei der Analyse wird lediglich die Differenz der Verkehrsleistung zwischen 2006 und 2016 berücksichtigt ohne eine künftige Entwicklung oder den Zwischenzeitraum zu beschreiben.

Damit sind folgende Transportarten, Distanzklassen sowie Verkehrsmittel betroffen:

- ▶ *Transportart:* Personenverkehr
- ▶ *Distanzklasse:* Nah- und Regionalverkehr
- ▶ *Verkehrsmittel:* Bahn, Nahlinienbus, Pkw

Durch die Angebotsausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein kommt es zu einem Anstieg der Verkehrsnachfrage und zu einer Verlagerung vom Pkw und von anderen öffentlichen Verkehrsmitteln. Neben den Verkehrsleistungen im Hauptlauf wird auch der Einfluss des Vor-/Nachlauf auf die Gesamtumweltwirkungen berücksichtigt.

Einflüsse auf Hintergrundsystem

Die Einflüsse auf das Hintergrundsystem betreffen vornehmlich den Infrastrukturausbau. Zum einen fand in dem Betrachtungszeitraum eine Elektrifizierung von Strecken statt und zum anderen wurden Bahnhöfen/Stationen (wieder) in Betrieb genommen.

4.3.6.2 Datengrundlage und -beschaffung

Mobilitätskenngrößen

Die Verkehrsleistung im SPNV in Schleswig-Holstein wird für das Jahr 2006 im landesweiten Nahverkehrsplan (LNVP) 2013-2017 (LVS Schleswig-Holstein, 2014) gegeben und die Verkehrsleistung des Jahres 2016 ist aus (eurailpress.de, 2017) ermittelt. Die durchschnittliche Fahrdistanz ist über (Intraplan, 2008) gegeben. Die Quelle bezieht sich hierbei auf die Jahre

2000 und 2005, wobei keine Änderung der Distanz in diesem Zeitraum feststellbar ist, sodass hier angenommen wird, dass die angegebene Fahrdistanz konstant bleibt.

Der Ursprung dieser Verkehrsleistungsänderung ist nicht eindeutig geklärt, jedoch wird im LNVP 2008-2012 (Schleswig-Holsteinischer Landtag, 2010) beschrieben, dass eine allgemeine Verkehrsnachfrageerhöhung um 4 % zwischen 2008 und 2012 zu erwarten war. Demgegenüber wird ein Rückgang in der Nachfrage durch den demographischen Wandel von 0,4 % angesetzt. Dies entspricht einer Nettoerhöhung von rund 0,89 % pro Jahr. Dieser Anstieg aufgrund der Bedarfsänderung wird für den Betrachtungszeitraum angenommen. Tabelle 60 fasst alle relevanten Größen zusammen.

Tabelle 60: Mobilitätskenngrößen – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“

	2006	2016
Verkehrsleistung [Mio. Pkm/a]	1.425	1.813
Mittlere Fahrdistanz [km]	27,39	
Anstieg des Mobilitätsbedarfs	+0,89 % p.a.	

Fahrzeugkenngrößen

Im LNVP 2008-2012 sind die Zug-km für das Jahr 2006 angegeben. (NAH.SH, 2019) zeigt die bestellten Zug-km für das Jahr 2016. In (Schmied/Seum 2009) wird der Anteil elektrischer Zug-km zu den gesamten Zug-km angegeben. Dieser Anteil erhöhte sich insbesondere durch die Elektrifizierung der Strecke Lübeck-Hamburg im Jahre 2008. Die Anteile der elektrischen Zug-km sind für die Jahre 2005 und 2012 gegeben. Es wird angenommen, dass sich die Anteile der Jahre 2006 und 2016 nicht gegenüber dem Wert von 2005 respektive 2012 änderte. Tabelle 61 fasst die gesamten Zug-km und den Anteil der elektrischen Fahrleistung zusammen.

Tabelle 61: Fahrzeugkenngrößen – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“

	2006	2016
Zug-km [Mio.]	22,54	24,60
Anteil elektrische Traktion	24,6 %	33,3 %

Für die Bahn soll auch die gesamte Wegekette berücksichtigt werden. Daher ist die Information nötig, wie die Bahnfahrgäste zum Bahnhof gelangen. Hierfür wird (Schleswig-Holsteinischer Landtag, 2010) verwendet. Diese gibt den Anteil für bestimmte Bahnhöfe in Schleswig-Holstein an. Es wird vereinfacht angenommen, dass der Wert für alle Bahnhöfe/Stationen gilt. Die jeweiligen Distanzen werden geschätzt, sodass sich folgende Werte ergeben: Pkw – 19 % (5 km), Fahrrad – 19 % (3 km) und Bus – 12 % (5 km).

Die spezifischen THG-Emissionsfaktoren der relevanten Verkehrsmittel sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Es wird vereinfacht angenommen, dass sich die spezifischen Emissionsfaktoren über den Zeitraum nicht geändert haben. Dies hat insbesondere auf den elektrisch betriebenen Zug negative Auswirkungen, da sich der Strommix über den Zeitraum verbessert hat.

Tabelle 62: THG-Emissionsfaktoren – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“

THG-Emissionsfaktoren	WTW	Fahrzeug	Infrastruktur
Dieselizeug [g CO _{2eq} /Fzkm]	8.185,8	87,4	960,9
Zug in Elektrotraktion [g CO _{2eq} /Fzkm]	4.601,1	87,4	1.353,3
Pkw [g CO _{2eq} /Pkm]	152,9	36,5	5,0
Nahlinienbus [g CO _{2eq} /Pkm]	80,5	6,5	1,6
Fahrrad [g CO _{2eq} /Pkm]	/	8,7	0,5

Hintergrundsystem

In (Schleswig-Holsteinischer Landtag, 2010) ist angegeben, dass im Jahr 2002 169 Bahnhöfe und Stationen in Betrieb waren und das Streckennetz eine Länge von 1.170 km aufwies. Im Jahr 2012 wurden nach (LVS Schleswig-Holstein, 2014) 180 Bahnhöfe und Stationen betrieben, wobei das Netz eine Länge von 1.179 km und 356 elektrifizierte Kilometer aufwies. Abzüglich der in den Zwischenjahren elektrifizierten Strecken hatte das elektrifizierte Netz eine Länge von 254 km im Jahr 2002. Da keine umfassenden Änderungen zwischen den Jahren 2002 und 2006 bzw. 2012 und 2016 stattfanden, ergeben sich folgende Eckdaten der Schieneninfrastruktur in Schleswig-Holstein.

Tabelle 63: Schieneninfrastruktur – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“

	2006	2016
Bahnhöfe/Stationen	169	180
Schienennetz [km]	1.170	1.179
Elektrisches Netz [km]	254	356

4.3.6.3 Methode und Berechnung

Mobilitäts- und Fahrzeugkenngrößen

Ein Teil des Anstiegs des Aufkommens ist bereits durch die Bedarfserhöhung zu erklären. Rechnerisch wäre es ausgehend von den 1.425 Mio. Pkm im Jahr 2006 und dem Wachstum von 0,89 % p.a. zu einer Verkehrsleistung von 1.557 Mio. Pkm im Jahr 2016 gekommen (+132 Mio. Pkm). Dies entspricht einer Differenz von 256 Mio. Pkm zur real eingetretenen Verkehrsleistung, dessen Ursprung nicht eindeutig identifizierbar ist. Demnach ist dies Bestandteil der Verlagerungsanalyse.

Es werden hierbei drei Fälle unterschieden:

Im Fall 1 „Nur Anstieg durch Bedarfserhöhung“ wird angenommen, dass keine Anpassung der Betriebsleistung bei der Bahn stattgefunden hätte und lediglich ein Anstieg der Verkehrsleistung in Höhe von 132 Mio. Pkm durch den erhöhten Bedarf stattgefunden hätte. Der Ausbau der Elektrifizierung wird in dem Fall ebenfalls nicht angenommen.

Fall 2 „+induzierter Verkehr“ beschreibt den eingetretenen Zustand, wobei der Anstieg, der nicht durch die Bedarfserhöhung zu erklären ist, durch induzierten Verkehr zu beschreiben ist, der durch das verbesserte Angebot entsteht.

Fall 3 „+vom Pkw verlagertes Verkehr“ hingegen geht davon aus, dass der zusätzliche Anstieg durch das verbesserte Angebot eine Verlagerung vom Pkw zur Bahn erfolgte. Bei dieser Verlagerung wird angenommen, dass die zurückgelegte Strecke bzgl. der Länge identisch bei beiden Verkehrsmitteln ist.

Das Aufkommen errechnet sich aus der Verkehrsleistung und der durchschnittlich zurückgelegten Distanz, die in allen drei Fällen über den gesamten Zeitraum konstant angenommen wird. Tabelle 64 fasst die Annahmen der drei Fälle zusammen.

Tabelle 64: Relevante Größen in den Fällen – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“

	Fall 1 Nur Anstieg durch Bedarfserhöhung	Fall 2 +induzierter Verkehr	Fall 3 +vom Pkw verlagertes Verkehr
Verkehrsleistung 2006 → 2016 [Mio. Pkm]	1.425 → 1.557	1.425 → 1.813	
Verkehrsaufkommen 2006 → 2016 [Mio.]	52,03 → 56,85	52,03 → 66,19	
Fahrleistung 2006 → 2016 [Mio. Fzkm]	22,54 → 22,54	22,54 → 24,60	
Anteil elektrische Zugkilometer 2006 → 2016	24,6 % → 24,6 %	24,6 % → 33,3 %	
Verlagerte Verkehrsleistung [Mio. Pkm]	/	/	256

Die Wegekette wird über die Verkehrsmittel, die für die Fahrt zum Bahnhof verwendet werden, und die angenommenen Distanzen miteinbezogen. Die Werte sind noch mit zwei zu multiplizieren, um die Strecke vom Bahnhof zum Ziel ebenfalls berücksichtigen zu können. Für die drei Fälle werden dieselben Werte angenommen. In Fall 3 wird bei den verlagerten Pkw-Fahrten davon ausgegangen, dass die komplette Strecke mit dem Pkw zurückgelegt worden wäre und daher keine Wegekette vorliegt. Die folgende Tabelle zeigt das zusätzliche Aufkommen und die Verkehrsleistungen der Verkehrsmittel des Vor-/Nachlaufs.

Tabelle 65: Vor-/Nachlauf in den Fällen – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“

Änderung von 2006 → 2016	Fall 1 Nur Anstieg durch Bedarfserhöhung	Fall 2 +induzierter Verkehr	Fall 3 +vom Pkw verlagertes Verkehr
Pkw: Verkehrsaufkommen	+915.800	+2.690.400	
Fahrrad: Verkehrsaufkommen	+915.800	+2.690.400	
Bus: Verkehrsaufkommen	+578.400	+1.699.200	
Pkw: Verkehrsleistung [Mio. Pkm]	+9,158	+26,904	
Fahrrad: Verkehrsleistung [Mio. Pkm]	+5,495	+16,142	
Bus: Verkehrsleistung [Mio. Pkm]	+5,784	+16,992	

Berechnung der Umweltwirkungen

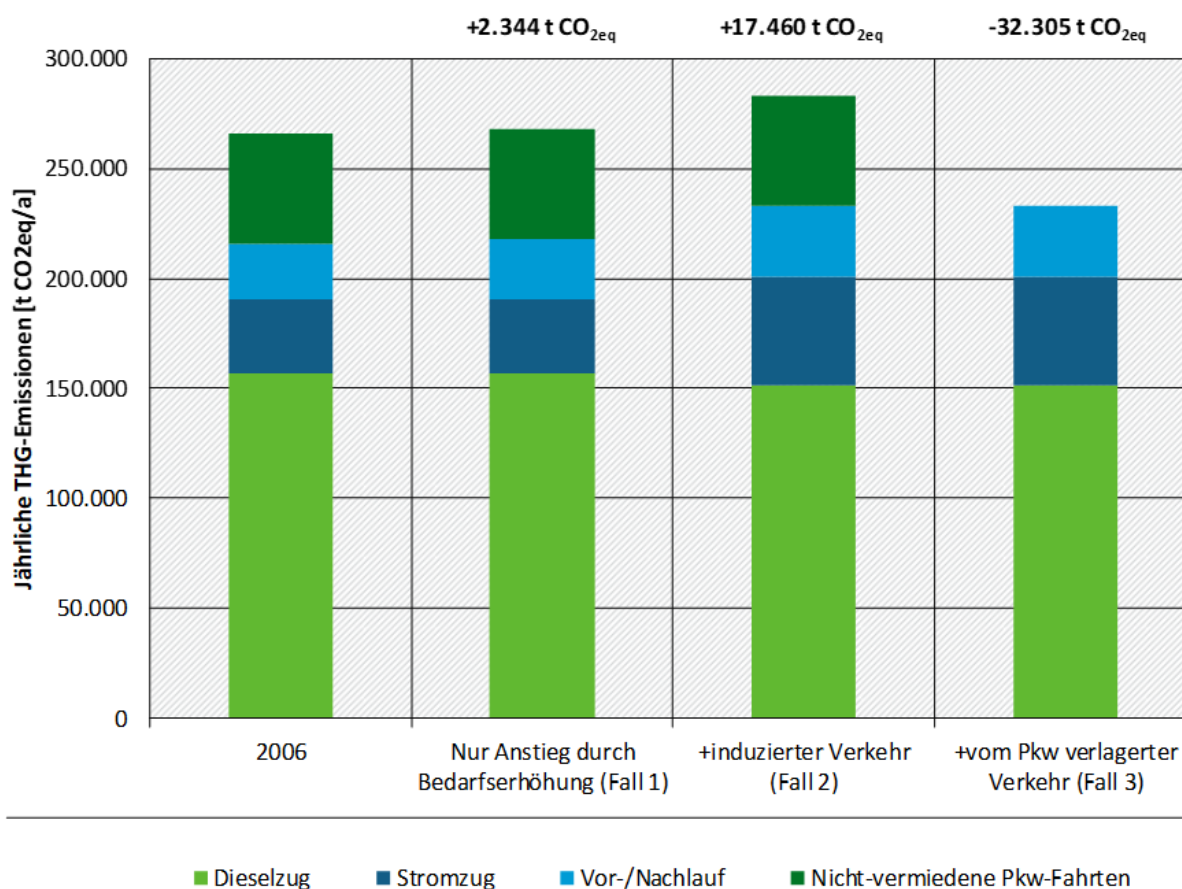
Ausgehend von den Fahrleistungen der Bahn und der verlagerten bzw. zusätzlichen Verkehrsleistung beim Pkw, Fahrrad und Bus können die THG-Emissionen ermittelt werden. Diese beschreiben die Differenz zwischen 2006 und 2016. Tabelle 66 und Abbildung 54 geben eine Übersicht der Ergebnisse.

Tabelle 66: THG-Emissionen in den Fällen – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“

THG-Emissionen für WTW, Fahrzeuge und Infrastruktur [t CO _{2eq} /a]	2006	Fall 1 Nur Anstieg durch Bedarfserhöhung	Fall 2 +induzierter Verkehr	Fall 3 +vom Pkw verlagertes Verkehr
Diesellozug	156.934	156.934	151.514	151.514
Zug in Elektrotraktion	33.501	33.501	49.493	49.493
Pkw (Vor-/Nachlauf)	19.218	20.998	24.450	24.450
Fahrrad (Vor-/Nachlauf)	543	594	691	691
Bus (Vor-/Nachlauf)	5.533	6.064	7.040	7.040
Nicht-verlagerte Pkw-Fahrten	49.765	49.765	49.765	0
Änderung gegenüber 2006	/	+2.344	+17.460	-32.305

Wäre keine Anpassung des Angebots vollzogen worden, so hätte dies lediglich zu ca. 2.344 t CO_{2eq} durch zusätzliches Verkehrswachstum im Vor-/Nachlauf geführt. Bei den real umgesetzten Anpassungen des SPNV kommt es im Fall, dass das verbesserte Angebot Verkehr induziert zu einem Anstieg der THG-Emissionen von 17.460 t CO_{2eq}/a. Bei einer kompletten Verlagerung vom Pkw auf die Bahn ist eine Reduktion von 32.305 t CO_{2eq}/a gegenüber 2006 zu erwarten; trotz des allgemeinen Anstiegs im Mobilitätsbedarf. Würden 36 % des aus dem verbesserten Angebot der Bahn resultierenden Aufkommens vom Pkw stammen, so ergäbe dies keine zusätzlichen Emissionen gegenüber dem Jahr 2006. Die Elektrifizierung hat sowohl in Fall 2 als auch in Fall 3 einen positiven Effekt. Werden diese beiden Fälle mit dem gleichen Fuhrpark (Anteil elektrische Fahrleistung bleibt auf dem Niveau von 2006) angenommen, so würden hierdurch zusätzliche THG-Emissionen von 6.832 t CO_{2eq}/a entstehen.

Abbildung 54: Jährlichen THG-Emissionen für WTW, Fahrzeug und Infrastruktur – „Ausweitung des SPNV in Schleswig-Holstein“



Quelle: eigene Berechnung

4.3.6.4 Auswertung und Diskussion

Es kann konstatiert werden, dass durch die allgemeine Bedarfserhöhung (z. B. durch zusätzliche Pendler) im SPNV in Schleswig-Holstein zwischen den Jahren 2006 und 2016 rund 2.344 t CO_{2eq}/a zusätzlich entstanden. Die real erfolgte Angebotsanpassung bewirkt einen Aufkommensanstieg, der nicht komplett über die allgemeine Bedarfserhöhung erklärt werden kann. Im Extremfall setzt sich das zusätzliche Aufkommen ausschließlich aus induziertem Verkehr zusammen (Fall 2). In diesem Fall resultiert aus der Angebotsverbesserung eine Erhöhung der Fahrgäste und somit eine THG-Erhöhung von 15.116 t CO_{2eq} pro Jahr, die zu den 2.344 t CO_{2eq} hinzukommen. Sollten demgegenüber die zusätzlich beobachteten Personenfahrten Pkw-Fahrten ersetzen, dann kämen hierdurch eine THG-Minderung von rund 32.305 t CO_{2eq}/a zustande (Fall 3).

Zusammenfassend ist die Bandbreite der Umweltwirkung des Ausbaus des SPNVs in Schleswig-Holstein zwischen +17.460 und -32.305 t CO_{2eq} pro Jahr zu beziffern. Demnach kann keine klare Aussage getroffen werden, ob die Angebotsausweitung einen positiven Effekt hatte. Sollten mehr als 36 % der durch die Angebotsanpassung resultierenden Fahrgäste vom Pkw stammen, hätte dies eine positive Bilanz. Die Elektrifizierung hat indes einen THG-mindernden Effekt von ca. 6.832 t CO_{2eq}/a.

Kritisch zu hinterfragen sind die Annahmen der Wegekettens. Die angenommenen Distanzen können durchaus von der Realität abweichen und auch die Anteile der verwendeten

Verkehrsmittel im Vor-/Nachlauf können deutlich zwischen den Bahnhöfen variieren, sodass die verwendeten Anteile stark von der Realität abweichen können. Da die zurückgelegten Distanzen in SPNV nicht sehr hoch sind, hat der Vor-/Nachlauf durchaus einen größeren Einfluss.

Des Weiteren werden über den Zeitraum konstante Emissionsfaktoren der Fahrzeuge angenommen. Dies ist jedoch aufgrund des veränderten Fuhrparks und auch des Strommixes eine Vereinfachung.

Die Allokation der THG-Emissionen durch die Infrastruktur ist darüber hinaus mit dem deutschlandweiten Mittelwert gerechnet. Jedoch könnte die in dem betrachteten Zeitraum ausgebaute Oberleitungsinfrastruktur durch eine geeignete Methode auf die jeweiligen Züge allokiert werden, wovon hier allerdings abgesehen wurde. Dies gilt auch für die Bahnhöfe/Stationen, die in Betrieb genommen wurden.

Quellenverzeichnis

- AGEB (2015): Vorwort zu den Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland.
- Albrecht, M.; Garber, L.; Könighaus, D. (2018): Machbarkeitsstudie Radschnellweg Rhein-Neckar Aktualisierung Mannheim – Heidelberg Verband Region Rhein-Neckar. Darmstadt.
- Allekotte, M.; Biemann, K.; Heidt, C.; Jamet, M.; Knörr, W. (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018). Veröffentlichung in Vorbereitung.
- Althaus, H.-J. (2012): Vehicle and context specific inclusion of road transport noise impacts in Life Cycle Assessment. In: *EMPA working paper*. Dübendorf.
- Andersen, J.; Cherrett, T. (2014): Straightsol project - Booklet.
- ASEAG (2018): ASEAG - Geschäftsbericht 2017. Aachen.
<http://berichte.kiongroup.com/2017/gb/lagebericht/ertrags-vermoegens-und-finanzlage/finanzlage.html#accordion3>.
- Baumann, D. (2019): Trotz Kritik an E-Rollern: Start-up-Gründer zieht positive Bilanz. In: *Frankfurter Rundschau*.
- Bäumer, M.; Hautzinger, H.; Pfeiffer, M.; Stock, W.; Lenz, B.; Kuhnimhof, T.; Köhler, K. (2016): Fahrleistungserhebung 2014: Begleitung und Auswertung - Schlussbericht zur Inlandsfahrleistung. Mannheim.
- Berger, M.; Finkbeiner, M. (2017): Vereinfachte Umweltbewertung des Umweltbundesamtes (VERUM 2.0).
<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/186602/PPAU0156-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y%0Ahttp://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127%0Ahttp://www.scielo.br/pdf/rae/v45n1/v45n1a08%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j>.
- BIEK (2017): Nachhaltigkeitsstudie 2017.
- BIEK (2018): KEP-Studie 2018 - Analyse des Marktes in Deutschland. Köln.
- BIEK (2019): Zahlen und Fakten. <https://www.biek.de/kep-branche/zahlen-und-fakten.html>. (07.02.2020).
- Bieler, C.; Sutter, D.; Lieb, C.; Sommer, H.; Amacher, M. (2019): Externe Effekte des Verkehrs 2015 - Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015. Zürich/ Bern.
- Bitter, D.; Waal, M. De; Häusle, M.; Kellner, M.; Pum, H.; Calliess, P. (2010): Personenlandverkehr Flughafen Wien-Schwechat.
- BMWi (2019): Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ - Abschlussbericht. *Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“*.
- Bogdanski, R. (2016): Nachhaltige Stadtlogistik durch KEP. Berlin.
- Bogdanski, R.; Bayer, M.; Seidenkranz, M. (2017): Projektsteckbrief - Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg. Nürnberg.
- Bruns, F.; Hofmann, S.; Dahl, A.; Walter, C. (2018): Allokation und Zuordnung öffentlicher Einnahmen und Ausgaben im Verkehr sowie Hemmnisse der Verkehrsvermeidung und -veranlagerung. Zürich.
- Bundesamt für Statistik (2019): Regionalporträts 2019: Gemeinden – Kennzahlen. Neuchatel.
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2019): Verordnung über die Teilnahme von Elektrokleinstfahrzeugen am Straßenverkehr (Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung - eKFV). In: *Gesetze-Im-Internet.De*.
- Chester, M. (2019): It's a Bird...It's a Lime...It's Dockless Scooters! But Can These Electric-Powered Mobility Options Be Considered Sustainable Using Life-Cycle Analysis? In: *chesterenergyandpolicy.com*.
- civity (2019): E-Scooter in Deutschland - Ein datenbasierter Debattenbeitrag.
- DB AG (2019): Persönliche Mitteilung.

- DB Umwelt (2019): Jährlich Auswertung der DB- Aktivitätsdaten für TREMOD.
- DESTATIS (2018a): Verkehr – Verkehrsunfälle 2017. Wiesbaden. Vol. Destatis F.
- DESTATIS (2018b): Verkehr - Luftverkehr auf allen Flugplätzen 2017.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Personenverkehr/Publikationen/Downloads-Luftverkehr/luftverkehr-alle-flugplaetze-2080620177004.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
- DESTATIS (2018c): Daten aus dem Gemeindeverzeichnis: Städte in Deutschland nach Fläche, Bevölkerung und Bevölkerungsdichte. In: *Gemeindeverzeichnis-Informationssystem GV-ISys*. Wiesbaden.
- DESTATIS (2019): Personenverkehr mit Bussen und Bahnen 2017. In: *Fachserie 8, Reihe 3.1*. No.2019.
- DG MOVE (2019): Handbook on the external costs of transport – Version 2019. Brüssel.
- DIN (2012): DIN EN 16258 - Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr).
- 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.
- DLR; IFEU; LBST; DBFZ (2015): Erneuerbare Energien im Verkehr - Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima, Berlin.
- Doll (2018a): Methodenkonvention 3.0 – Weiterentwicklung und Erweiterung der Methodenkonvention zur Schätzung von Umweltkosten. Sachverständigengutachten AP 1: Umweltkosten durch Lärm. Karlsruhe.
- Doll (2018b): Persönliche Information von Claus Doll und Hintergrundinformationen zum Excel-Lärmmodell, als Grundlage des Sachverständigengutachtens AP 1: Umweltkosten durch Lärm (Teil der Methodenkonvention 3.0 – Weiterentwicklung und Erweiterung der Methodenkonvention).
- Del Duce, A.; Egede, P.; Öhlschläger, G.; Dettmer, T.; Althaus, H.-J.; Büttler, T.; Szczechowicz, E. (2013): Guidelines for the LCA of electric vehicles. http://www.elcar-project.eu/fileadmin/dokumente/Guideline_versions/eLCAR_guidelines.pdf.
- EBP (2018): Modalsplit-Erhebung Flughafen Zürich 2017. S. 23.
- EC - Joint Research Centre (2010): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. Luxembourg.
- EcoTransIT (2019): EcoTransIT World - Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports - Methodology and Data Update 2019.
- eurailpress.de (2017): Schleswig-Holstein: Nahverkehr mit deutlich mehr Nachfrage – Modal Split gestiegen. <https://www.eurailpress.de/nachrichten/betrieb-services/detail/news/schleswig-holstein-nahverkehr-mit-deutlich-mehr-nachfrage-modal-split-gestiegen.html>.
- Flixbus (2019): Aktivitätsdaten zum Fernlinienbusverkehr von Flixbus für das Jahr 2018 für TREMOD.
- Friedrich, H. . (2002): Kernkompetenz Leichtbau, Schlüsseltechnologie zur Verbrauchsreduzierung.
- Fritsche, U. (2019): Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 5.
- Giegrich, J.; Liebich, A.; Lauwigi, C.; Reinhardt, J. (2012): Indikatoren/ Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. In: *Umweltbundesamt*.
- Gipp, C. (2015): Der Fernverkehrsmarkt nach der Einführung von Fernbussen. In: *IGES Mobilitätsberatung*.
- Gubmann, J.; Jung, A.; Kiel, T.; Strehmann, J. (2019): E-Tretroller im Stadtverkehr - Handlungsempfehlungen für deutsche Städte und Gemeindem zum Umgang mit stationslosen Verleihsystemen.
- Helms, H., Lambrecht, U., Höpfner, U. (2003): Energy savings by light weighting (in the transport sector). London.

- Helms, H.; Biemann, K.; Kämper, C.; Lambrecht, U.; Jöhrens, J.; Meyer, K. (2019): Klimabilanz von Elektroautos - Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial.
- Helms, H.; Jöhrens, J.; Kämper, C.; Giegrich, J.; Liebich, A.; Vogt, R.; Lambrecht, U. (2016): Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. UBA Texte, 27/2016., Dessau-Roßlau. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/weiterentwicklung-vertiefte-analyse-der> (05.04.2016).
- Hischier, R.; Weidema, B.; Althaus, H.-J.; Bauer, C.; Doka, G.; Dones, R.; Frischknecht, R.; Hellweg, S.; Humbert, S.; Jungbluth, N.; Köllner, T.; Loerincik, Y.; Margni, M.; Nemecek, T. (2010): Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. https://db.ecoinvent.org/reports/03_LCIA-Implementation-v2.2.pdf.
- Hollingsworth, J.; Copeland, B.; Johnson, J. X. (2019): Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters. In: *Environmental Research Letters*. IOP Publishing. Vol. 14, No.8, S. 084031.
- Huijbregts, M. A. J.; Hellweg, S.; Hertwich, E. (2011): Do we need a paradigm shift in life cycle impact assessment? In: *Environmental Science and Technology*. Vol. 45, No.9, S. 3833–3834.
- ifeu (2000): Wissenschaftlicher Grundlagenbericht zur „Mobilitäts-Bilanz“ und zum Softwaretool „Reisen und Umwelt in Deutschland“. Im Auftrag der Deutschen Bahn AG und der Umweltstiftung WWF-Deutschland. Heidelberg.
- ifeu (2007): The potential contribution of light-weighting to reduce transport energy consumption. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 12, S. 58–64.
- IGES Institut (2014): Bahnkunden und Autofahrer lassen Fernbusmarkt wachsen. In: *Pressemitteilung vom 17. April 2014*. Vol. 2014, No.April.
- Ilgmann, G. (1998): Gewinner und Verlierer einer CO₂-Steuer im Güter- und Personenverkehr. Ottobrunn.
- Ingenieurbüro H. Berg & Partner (2017): Machbarkeitsstudie zum Radschnellweg Aachen - Herzogenrath/Kerkrade/Heerlen. Aachen.
- Intraplan (2008): Perspektive ÖPNV in Schleswig-Holstein. München.
- IPCC (2007): Climate change 2007 - The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm.
- IPCC (2013): Climate Change 2013 - The physical science basis. Working Group 1 Contribution to the 5th Assessment Report of the IPCC. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- ISO (2006a): Umweltmanagement — Ökobilanz — Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO/FDIS 14040:2006).
- ISO (2006b): Umweltmanagement — Ökobilanz — Anforderungen und Anleitungen (ISO/FDIS 14044:2006).
- Jäschke, M. (2012): Lärmkartierung und Ruhige Gebiete. In: *Dissertation*. Dresden.
- Jellinek, R.; Raimund, W.; Schübl, J.; Zopf-Renner, C.; Reiter, K.; Wrighton, S.; Anzböck, R.; Weber, F. (2016): Radkombitransport Donaukanal. Wien.
- JRC (2011a): Well-to-wheels analysis of alternative fuels and powertrains in the European context. In: *VDI Berichte*.
- JRC (2011b): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook- Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context.
- KBA (n.d.): Bestand und Neuzulassungen - Bereitstellung der Jahresdaten für TREMOD.
- Knappe, F.; Reinhardt, J.; Bergmann, T.; Mottschall, M. (2015): Umweltforschungsplan des Naturschutz , Bau und Reaktorsicherheit Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub.
- Knörr, W.; Allekotte, M.; Heidt, C.; Jamet, M.; Gores, S. (2019): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018). im Auftrag des

Umweltbundesamtes.

- Knörr, W.; Heidt, C.; Gores, S.; Bergk, F. (2016): Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014). Im Auftrag des Umweltbundesamtes. In Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut.
- Knörr, W.; Hüttermann, R. (2016): EcoPassenger - Environmental Methodology and Data - Update 2016.
- Korn, M.; Leupold, A.; Schneider, C.; Hartwig, K.-H.; Daniels, H. (2018): Endbericht: Berechnung der Wegekosten für das Bundesfernstraßennetz sowie der externen Kosten nach Maßgabe der Richtlinie 1999/62/EG für die Jahre 2018 bis 2022. Weimar, Leipzig, Aachen, Münster, Köln.
- Krier, C.; Chretien, J.; Louvet, N. (2019): Uses and user of free-floating e-scooters in France.
- Leonardi, J.; Browne, M.; Allen, J. (2012): Before-After Assessment of a Logistics Trial with Clean Urban Freight Vehicles: A Case Study in London. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Vol. 39, S. 146–157.
- Lienhop, M.; Thomas, D.; Brandies, A.; Kämper, C.; Jöhrens, J.; Helms, H. (2015): PEDELECTION - Verlagerungs- und Klimaeffekte durch Pedelec-Nutzung im Individualverkehr.
- Link, H.; Kalinowska, D.; Kunert, U.; Radke, S. (2009): Wegekosten und Wegekostendeckung des Straßen- und Schienenverkehrs in Deutschland im Jahr 2007. Berlin.
- LVS Schleswig-Holstein (2014): LNVP bis 2017. Kiel. <https://www.nah.sh/assets/pdf/91ac8527e6/LNVP-bis-2017web.pdf>.
- Matiasek, F. (2011): Die Intermodale Schnittstelle Radverkehr - ÖV.
- MIT (2017): Mobilität in Tabelle (MIT 2017).
- Mottschall, M.; Bergmann, T. (2013): Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland. Berlin.
- München.de (2019): E-Scooter leihen: Was die Anbieter unterscheidet.
- myLogistics (2018): 80.000 Pakete per Lastenrad in Nürnberg: DPD erweitert Lastenrad-Einsatz auf weitere Städte. <http://mylogistics.net/2018/04/04/80-000-pakete-per-lastenrad-in-nuernberg-dpd-weitert-lastenrad-einsatz-auf-weitere-staedte-aus/>. (27.02.2019).
- NAH.SH (2019): Bestellte Zugkilometer und Abgeltung im SPNV in Schleswig-Holstein 2016. <https://www.nah.sh/assets/downloads/Berichte/2019-09-17-Bestellte-Zugkilometer-und-Abgeltung-im-SPNV-in-Schleswig-Holstein-2016.pdf>. (08.11.2019).
- Ninnemann, J.; Hölter, A.-K.; Beecken, W.; Thyssen, R.; Tesch, T. (2017): Last-Mile-Logistics Hamburg – Innerstädtische Zustelloogistik. Hamburg.
- Nobis, C. (2019): Mobilität in Deutschland – Mid Analysen zum Radverkehr und Fußverkehr. www.mobilitaet-in-deutschland.de.
- Nobis, C.; Kuhnimhof, T. (2019): Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Bonn. www.mobilitaet-in-deutschland.de.
- Otten, M.; 't Hoen, M.; den Boer, E. (2015): STREAM passenger transport 2014 Version 1.1. Delft.
- Otten, M.; Hoen, M.; den Bor, E. (2016): STREAM Freight transport 2016 - Emissions of freight transport modes. Delft.
- PCR (2009): Product Category Rules for preparing an Environmental Product Declaration (EPD) for Interurban railway transport services of passengers, Railway transport services of freight and Railways. PCR 2009:03, Version 1.0 (2009-08-18). <http://www.environdec.com/en/Product-Category-Rules/Detail/?Pcr=5794>. (02.07.2017).
- Pfragner, P. (2013): Intermodal Hub Frankfurt Airport. http://www.meta-cdm.org/workshops/workshop2/3_Pfragner_IntermodalHubFrankfurtAirport.pdf. (08.11.2019).
- PTV Transport Consult (2017): Radschnellweg Euregio - Potenzialanalyse - Nutzen-Kosten-Analyse. Düsseldorf.
- Radke, S. (2018): Verkehr in Zahlen 2018/2019 47. Jahrgang. In: *Verkehr in Zahlen*. Berlin.

- Raiber, S. (2015): Kurzstudie Innenstadtlogistik Stuttgart. Stuttgart.
- Rauschenberg, R. H. (1999): Potentiale für die Verringerung der externen Effekte des Verkehrssektors durch einen dezentralisierten und automatisierten Gütertransport der Bahn.
- rbb24 (2019): Nachts, wenn der Transporter in Berlin auf E-Scooter-Suche geht. In: *rbb24*.
- Regionalverband Ruhr (2014): Machbarkeitsstudie Radschnellweg Ruhr - RS1. Essen.
- Schleswig-Holsteinischer Landtag (2010): Landesweiter Nahverkehrsplan für Schleswig-Holstein 2008 bis 2012. Kiel.
- Schmied, M.; Knörr, W. (2013): Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258. Begriffe, Methoden, Beispiele 2. aktualisierte Auflage (Stand: März 2013). Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. (DSL), Bonn.
- Schmied, M.; Mottschall, M. (2013): Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn.
- Schmied, M.; Mottschall, M.; Löchter, A. (2013): Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland. Berlin.
- Schmied, M.; Seum, S. (2009): ÖPNV und Klimaschutz in Schleswig-Holstein. Vol. 49, No.0.
- Schreyer, C.; Maibach, M.; Sutter, D.; Doll, C.; Bickel, P. (2007): Externe Kosten des Verkehrs in Deutschland - Aufdatierung 2005. Berlin/ Karlsruhe/ Zürich.
- Schroten, A.; van Essen, H.; Aarnink, S.; Verhoef, E.; Knockaert, J. (2014): Externe en infrastructuurkosten van verkeer. *www.ce.nl*.
- Schwarzer, C.; Treber, M. (2013): Emissionsminderung durch Hochgeschwindigkeitszüge. Berlin. <https://germanwatch.org/sites/germanwatch.org/files/publication/8108.pdf>.
- SFMTA (2019): Powered Scooter Share Mid-Pilot Evaluation - Executive Summary.
- Statistisches Bundesamt (2018): Statistisches Jahrbuch 2018. Wiesbaden.
- Steger, S.; Fekkak, M.; Bringezu, S. (2011): Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.3 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes). Wuppertal.
- Steinberg, G.; Hoenninger, P.; Gwiasda, P.; Eler, L.; Stein, D.; Röhling, W. (2017): Machbarkeitsstudie e-Machbarkeitsstudie e-Radschnellweg Braunschweig - Wolfsburg. Dortmund, Köln.
- Tagesspiegel (2019): Laden, Parken, Putzen - die Logistik hinter Berlins Sharing Economy.
- Trapp, J. H.; Arndt, W.; Libbe, J.; Schneider, S.; Maic, V.; Winkelhaus, J.; Mottschall, M.; Bauknecht, D.; Bergmann, T.; Gröger, J. (2017): Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest. Dessau-Roßlau.
- Tuchschmid, M.; Halder, M. (2010): mobitool – Grundlagenbericht. Zürich. http://mobitool.ch/typo_static/fileadmin/tools/mobitool-Hintergrundbericht.pdf.
- UBA (2002): TÜV Automotive – Reifen/Räder-Test-Center: Abrollgeräusch, Rollwiderstand und Nassbremsverhalten von Nutzfahrzeug-Reifen, laufende Messungen im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Umweltbundesamt (2014): Best-Practice-Kostensätze für Luftschadstoffe, Verkehr, Strom- und Wärmeerzeugung. Anhang B der "Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten." Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (2019a): Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze. Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (2019b): E-Scooter momentan kein Beitrag zur Verkehrswende.
- Umweltbundesamt UBA (2020): Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr in Deutschland - Bezugsjahr 2018. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr->

- laerm/emissionsdaten#verkehrsmittelvergleich_personenverkehr.
- VDV (2018): VDV-Statistik 2017. In: *VDV-Statistik*. <http://www.vdv.de>.
- Veenstra, J. (2017): DHL vervangt busjes door bezorgfietsen in Utrecht. <https://marketingfuel.nl/dhl-vervangt-busjes-door-bezorgfietsen-in-utrecht/>. (27.02.2019).
- Verlinde, S.; Macharis, C.; Milan, L.; Kin, B. (2017): Does a Mobile Depot make urban deliveries faster, more sustainable and more economically viable: results of a pilot test in Brussels. mobil.TUM 2014, Brüssel.
- VROM (2006): Reken- en meetvoorschrift wegverkeerslawaaai 2006. The Hague (NL).
- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), H. (2011): Zentrale Binnenschiffsbestandsdatei. Bestand der Flotte 2010. <https://www.wsv.de/Schifffahrt/Statistik/zentr.Binnenschiffskartei/index.html>. (02.08.2017).
- Weidema, B. P.; Bauer, C.; R., H.; Mutel, C.; Nemecek, T.; Reinhard, J.; Vadenbo, C. O.; Wernet, G. (2013): Overview and methodology - Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. St. Gallen. https://www.ecoinvent.org/files/dataqualityguideline_ecoinvent_3_20130506.pdf.
- Werner, F.; Althaus, H. .; Richter, K.; Scholz, R. W. (2007): Post-consumer waste wood in attributive product LCA: Context specific evaluation of allocation procedures in a functionalistic conception of LCA. In: *International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 12, S. 160–172.
- WHO (2011): Burden of disease from Burden of disease from. S. 126.
- Zimmer, W.; Cyganski, R.; Dünnebeil, F.; Peter, M. (2016): ENDBERICHT RENEWABILITY III - OPTIONEN EINER DEKARBONISIERUNG DES VERKEHRSSSEKTORS.
- ZIV (2018a): Zahlen – Daten – Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland 2017.
- ZIV (2018b): Zahlen - Daten - Fakten zum Deutschen E-Bike-Markt 2017. https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PM_2018_13.03._E-Bike-Markt_2017.pdf. (08.11.2019).

A Anhang: Datengrundlagen

A.1 Verkehrsmengengerüst Deutschland 2017

Tabelle 67: Verkehrsmengengerüst Deutschland 2017 (Personenverkehr)

	Auslastung [%]	Fahrleistung [Mrd. Fzkm]	Verkehrsleistung [Mrd. Pkm]	Betriebsleistung [Mrd. Platzkm]
Pkw	32 %	642,3	934,9	2.890,1
Schienennahverkehr	27 %	0,6	54,9	200,1
Straßen-/Stadt-/U-Bahn	19 %	0,3	17,7	95,0
Nahlinienbus	19 %	2,5	37,5	194,8
Kraftrad	54 %	9,8	10,6	19,5
Moped	83 %	4,7	4,7	5,7
Flug (international)	82 %	1,2	229,7	279
Flug (national)	73 %	0,1	10,1	13,9
Schienerfernverkehr	56 %	0,1	40,3	72,5
Fernlinienbus	57 %	0,1	4,6	8,1

Tabelle 68: Verkehrsmengengerüst Deutschland 2017 (Güterverkehr)

	Auslastung [%]	Fahrleistung [Mrd. Fzkm]	Verkehrsleistung [Mrd. tkm]	Betriebsleistung [Mrd. Kap.-tkm]
Lieferwagen	k. A.	49,0	k. A.	k. A.
Lkw 3,5-7,5 t	32 %	7,6	7,1	22,7
Lkw >7,5-12t	32 %	3,0	4,8	15,2
Lkw >12t	35 %	10,4	40,7	116,5
Last-/Sattelzug >34-40t	45 %	40,6	439,6	975,2
Flug (international)	51 %	0,3	12,4	24,4
Flug (national)	17 %	0,0	0,1	0,3
Schiengüterverkehr	57 %	0,2	129,9	226,9
Binnenschiff	50 %	0,1	55,5	111,5

A.2 Ergebnisse für den Fahrzeugbetrieb (TTW)

Tabelle 69: Energie- und Emissionsfaktoren Fahrzeugbetrieb (TTW, Personenverkehr)

	GWP in g CO _{2eq} /Pkm	KEA in kJ/ Pkm	CO in mg/Pkm	NO _x in mg/Pkm	NMVOC in mg/Pkm	SO ₂ in mg/Pkm	PM ₁₀ / PM _{2,5} in mg/Pkm
Pkw	131	1.713	996	379	80	0,6	4
Schienen- nahverkehr	16	467	18	159	7	0,1	3
Straßen-/Stadt- /U-Bahn	0	383	0	0	0	0,0	0
Nahlinienbus	69	928	57	342	7	0,3	4
Kraftrad	151	1.693	6.240	156	972	0,6	15
Moped	91	806	4.382	66	2.517	0,3	201
Pedelec	0	25	0	0	0	0,0	0
Reisebus	26	352	45	119	3	0,1	2
Flug (international)	177	1.153	58	420	7	5,4	4
Flug (national)	179	2.315	256	900	37	10,9	8
Schienen- fernverkehr	1	219	2	11	0	0,0	0
Fernlinienbus	25	334	25	64	1	0,1	1

Tabelle 70: Energie- und Emissionsfaktoren Fahrzeugbetrieb (TTW, Güterverkehr)

	GWP in g CO _{2eq} /tkm	KEA in kJ/ tkm	CO in mg/tkm	NO _x in mg/tkm	NMVOC in mg/tkm	SO ₂ in mg/tkm	PM ₁₀ / PM _{2,5} in mg/Pkm
Lkw 3,5-7,5 t	450	5.994	905	2.151	90	2	47
Lkw >7,5-12t	314	4.191	469	1.177	35	2	23
Lkw >12t	185	2.459	291	702	16	1	12
Last-/Sattelzug >34-40t	82	1.085	71	167	4	0,4	3
Flug (international)	1.311	8.001	245	3.091	25	38	26
Flug (national)	1.660	22.121	2.291	8.942	218	104	71
Schienen- güterverkehr	2	131	3	20	1	0,1	0.3

	GWP in g CO _{2eq} /tkm	KEA in kJ/tkm	CO in mg/tkm	NO _x in mg/tkm	NMVOC in mg/tkm	SO ₂ in mg/tkm	PM ₁₀ /PM _{2,5} in mg/Pkm
Binnenschiff	27	361	66	398	18	0,1	10

A.3 Ergebnisse der Energiebereitstellung (WTT)

Tabelle 71: Energie- und Emissionsfaktoren Energiebereitstellung (WTT, Personenverkehr)

	GWP in g CO _{2eq} /Pkm	KEA in kJ/Pkm	CO in mg/Pkm	NO _x in mg/Pkm	NMVOC in mg/Pkm	SO ₂ in mg/Pkm	PM ₁₀ /PM _{2,5} in mg/Pkm
Pkw	22	361	16	70	66	55	3
Schienen-nahverkehr	43	398	26	44	7	27	2
Straßen-/Stadt-/U-Bahn	59	531	35	54	2	27	2
Nahlinienbus	12	204	9	38	22	30	2
Kraftrad	22	341	16	69	88	52	3
Moped	10	162	8	33	42	25	1
Pedelec	4	43	2	4	0,1	2	0,1
Reisebus	5	79	3	14	9	12	1
Flug (international)	18	0	10	43	29	37	2
Flug (national)	36	452	21	90	60	77	3
Schienen-fernverkehr	32	291	19	30	1	15	1
Fernlinienbus	4	74	3	14	8	11	1

Tabelle 72: Energie- und Emissionsfaktoren Energiebereitstellung (WTT, Güterverkehr)

	GWP in g CO _{2eq} /tkm	KEA in kJ/tkm	CO in mg/tkm	NO _x in mg/tkm	NMVOC in mg/tkm	SO ₂ in mg/tkm	PM ₁₀ in mg/tkm
Lkw 3,5-7,5 t	78	1.331	58	246	149	201	11
Lkw >7,5-12t	54	926	40	172	104	141	7
Lkw >12t	32	543	24	101	61	82	4

	GWP in g CO _{2eq} /tkm	KEA in kJ/ tkm	CO in mg/tkm	NO _x in mg/tkm	NMVOC in mg/tkm	SO ₂ in mg/tkm	PM ₁₀ in mg/tkm
Last-/Sattelzug >34-40t	14	240	10	44	27	36	2
Flug (international)	120	1.498	70	297	199	255	11
Flug (national)	346	4.321	203	857	573	736	32
Schienen- güterverkehr	17	150	10	16	1	8	1
Binnenschiff	6	71	3	14	9	12	1

A.4 Ergebnisse für Fahrzeugherstellung, -wartung und -entsorgung

Tabelle 73: Energie- und Emissionsfaktoren der Fahrzeuge (Personenverkehr)

	GWP in g CO _{2eq} /Pkm	KEA in kJ/ Pkm	CO in mg/Pkm	NO _x in mg/Pkm	NMVOC in mg/Pkm	SO ₂ in mg/Pkm	PM ₁₀ / PM _{2.5} in mg/Pkm
Pkw	36,5	558,6	189,0	68,8	58,2	147,7	43,8 (davon 22,8 mg PM2.5)
Schienen- nahverkehr	1,0	15,3	8,6	2,4	1,3	5,3	2,0 (1,0)
Straßen-/Stadt- /U-Bahn	4,8	72,6	16,7	8,8	4,9	18,4	4,0 (2,0)
Nahlinienbus	6,5	104,9	44,9	15,6	10,1	27,0	11,1 (5,7)
Kraftrad	20,1	346,6	107,8	40,7	33,0	71,1	25,7 (14,2)
Moped	18,3	315,0	98,0	37,0	30,0	64,6	23,3 (12,9)
Fahrrad	8,7	123,1	46,1	19,6	4,8	26,5	11,3 (7,1)
Pedelec	10,6	148,8	41,7	27,0	6,8	78,4	16,2 (10,4)
Reisebus	2,8	45,2	18,4	6,6	4,4	11,7	4,6 (2,3)
Flug (international)	0,2	2,3	0,3	0,3	0,1	0,9	0,1 (0,01)
Flug (national)	0,8	9,7	1,4	1,2	0,2	4,0	0,5 (0,01)
Schienen- fernverkehr	0,7	7,0	3,3	1,3	1,0	2,7	0,8 (0,4)

	GWP in g CO _{2eq} /Pkm	KEA in kJ/ Pkm	CO in mg/Pkm	NO _x in mg/Pkm	NMVOC in mg/Pkm	SO ₂ in mg/Pkm	PM ₁₀ / PM _{2.5} in mg/Pkm
Fernlinienbus	2,2	35,2	14,3	5,1	3,4	9,1	3,6 (1,8)

Tabelle 74: Energie- und Emissionsfaktoren der Fahrzeuge (Güterverkehr)

	GWP in g CO _{2eq} /tkm	KEA in kJ/ tkm	CO in mg/tkm	NO _x in mg/tkm	NMVOC in mg/tkm	SO ₂ in mg/tkm	PM ₁₀ / PM _{2.5} in mg/Pkm
Lkw 3,5-7,5 t	39,9	720,5	237,0	91,5	80,0	149,0	50,5 (24,4)
Lkw >7,5-12t	16,3	281,7	113,8	37,8	31,7	62,8	23,9 (11,2)
Lkw >12t	12,8	221,8	100,6	30,0	24,5	51,0	21,2 (9,8)
Last-/Sattelzug >34-40t	7,7	140,6	62,0	18,1	15,5	30,5	13,2 (6,2)
Flug (international)	1,2	13,7	2,0	1,6	0,3	5,6	0,8 (0,5)
Flug (national)	0,8	9,7	1,4	1,2	0,2	4,0	0,5 (0,4)
Schienen- güterverkehr	2,0	29,2	13,4	4,0	1,9	5,9	3,2 (1,6)
Binnenschiff	1,7	23,7	16,9	3,9	26,3	7,5	3,1 (1,4)

Tabelle 75: Energie- und Emissionsfaktoren der Fahrzeuge (sonstige)

	GWP in g CO _{2eq} /km	KEA in kJ/ km	CO in mg/km	NO _x in mg/km	NMVOC in mg/km	SO ₂ in mg/km	PM ₁₀ / PM _{2.5} in mg/Pkm
Lieferwagen	49,5	722,5	253,7	95,1	80,8	205,9	65,1 (33,1)
Lastenrad	14,0	193,9	65,3	34,4	8,2	78,9	20,5 (13,0)

A.5 Datengrundlagen und Ergebnisse für Infrastrukturbereitstellung, -betrieb, -unterhalt und -entsorgung

Tabelle 76: Energie- und Emissionsfaktoren der Infrastruktur (Personenverkehr)

	GWP in g CO _{2eq} /Pkm	CO in mg/Pkm	NO _x in mg/Pkm	NMVOC in mg/Pkm	SO ₂ in mg/Pkm	PM ₁₀ / PM _{2.5} in mg/Pkm
Pkw	5,0	14,8	16,4	10,9	9,4	19 (7,3)
Schienen- nahverkehr	13,9	64,6	20,6	10,1	15,0	15,4 (6,9)
Straßen-/Stadt- /U-Bahn	14,0	73,2	22,5	9,6	17,2	17,7 (8)
Nahlinienbus	1,6	4,2	5,7	3,8	3,2	8,3 (3,2)
Kraftrad	2,2	5,2	5,5	3,7	3,2	7,4 (2,8)
Moped	2,1	3,5	3,3	2,2	1,9	4,2 (1,6)
Fahrrad	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1 (0)
Pedelec	0,6	0,9	0,2	0,1	0,2	0,2 (0,1)
Reisebus	0,3	1,0	1,1	0,7	0,6	1,3 (0,5)
Flug (international)	2,4	2,8	6,8	1,2	1,2	1,3 (0,6)
Flug (national)	2,4	2,8	6,8	1,2	1,2	1,3 (0,6)
Schienen- fernverkehr	12,4	64,7	21,0	9,8	16,0	15,4 (6,8)
Fernlinienbus	0,1	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3 (0,1)

Tabelle 77: Energie- und Emissionsfaktoren der Infrastruktur (Güterverkehr)

	GWP in g CO _{2eq} /tkm	CO in mg/tkm	NO _x in mg/tkm	NMVOC in mg/tkm	SO ₂ in mg/tkm	PM ₁₀ / PM _{2.5} in mg/Pkm
Lkw 3,5-7,5 t	10,8	35,2	44,2	29,5	24,9	50,6 (19,5)
Lkw >7,5-12t	7,3	23,2	27,8	18,5	15,7	31,9 (12,3)
Lkw >12t	3,8	12,2	13,9	9,2	7,9	15,3 (5,9)
Last-/Sattelzug >34-40t	2,8	10,4	12,9	8,5	7,3	13,6 (5,3)
Flug (international)	24,3	28,0	68,1	12,1	12,2	13 (6,3)
Flug (national)	24,3	28,0	68,1	12,1	12,2	13 (6,3)
Schienen- güter- verkehr	12,0	48,3	15,8	7,9	10,5	11,5 (5,2)
Binnenschiff	8,1	53,9	18,4	14,6	17,2	10,8 (4,6)

Tabelle 78: Energie- und Emissionsfaktoren der Infrastruktur (sonstige)

	GWP in g CO _{2eq} /km	CO in mg/km	NO _x in mg/km	NMVOC in mg/km	SO ₂ in mg/km	PM ₁₀ / PM _{2.5} in mg/Pkm
Lieferwagen	31,7	90,3	102,0	67,8	58,1	121,9 (47)
Lastenrad	12,1	12,3	3,0	1,7	2,4	2,7 (1,2)

Tabelle 79: Allokationsfaktoren der Infrastruktur im Straßenverkehr nach PCU (80 % Gewichtung)

	Fahrrad	FLBus	KKR	KR	Lastenrad	Lbus	LNF	Pedelec	Pkw	Rbus	SNF
Autobahn		0 %		0 %		0 %	4 %		73 %	0 %	22 %
Bundesstraße außerorts	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	3 %	0 %	83 %	0 %	13 %
Landesstraße außerorts	0 %	0 %	0 %	1 %	0 %	1 %	5 %	0 %	87 %	0 %	7 %
Kreisstraße außerorts	0 %	0 %	0 %	1 %	0 %	1 %	5 %	0 %	86 %	0 %	7 %
Gemeindestraße außerorts	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	4 %	0 %	83 %	0 %	11 %
Bundesstraße innerorts	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	5 %	0 %	79 %	0 %	15 %
Landesstraße innerorts	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	6 %	0 %	88 %	0 %	5 %
Kreisstraße innerorts	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	5 %	0 %	86 %	0 %	7 %
Gemeindestraße innerorts	0 %	0 %	1 %	1 %	0 %	1 %	6 %	0 %	87 %	0 %	5 %

Tabelle 80: Allokationsfaktoren der Infrastruktur im Straßenverkehr nach AASHO (20 % Gewichtung)

	Fahrrad	FLBus	KKR	KR	Lastenrad	Lbus	LNF	Pedelec	Pkw	Rbus	SNF
Autobahn		0 %		0 %		0 %	0 %		0 %	0 %	100 %
Bundesstraße außerorts	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	0 %	0 %	0 %	0 %	99 %
Landesstraße außerorts	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	2 %	0 %	0 %	1 %	1 %	96 %

	Fahr- rad	FLBus	KKR	KR	Lasten- rad	Lbus	LNF	Pedelec	Pkw	Rbus	SNF
Kreisstraße außerorts	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	2 %	0 %	0 %	1 %	0 %	97 %
Gemeindestraße außerorts	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	3 %	0 %	0 %	1 %	0 %	96 %
Bundesstraße innerorts	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	0 %	0 %	0 %	0 %	98 %
Landesstraße innerorts	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	3 %	0 %	0 %	1 %	0 %	95 %
Kreisstraße innerorts	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	3 %	0 %	0 %	1 %	0 %	95 %
Gemeindestraße innerorts	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	10 %	0 %	0 %	3 %	1 %	85 %

Tabelle 81: Allokationsfaktoren der Infrastruktur im Schienenverkehr nach Btkm

	SGV	SPFV	SPNV	SSU
Eisenbahn Ausbaustrecke	63 %	21 %	17 %	
Eisenbahn Hochgeschwindigkeitsstrecke	43 %	44 %	12 %	
Eisenbahn sonstiges Netz	62 %	10 %	28 %	
Straßen- Stadtbahn oberirdisch eigene Trasse				100%

Tabelle 82: Allokationsfaktoren der Infrastruktur im Luftverkehr nach Verkehrseinheiten

	LGVI	LGVN	LPVI	LPVN
gesamter Flugplatz	34 %	0 %	63 %	3 %

A.6 Datengrundlagen und Ergebnisse kumulierter Rohstoffaufwand

Tabelle 83: KRA-Ergebnisse der Fahrzeuge (Personenverkehr)

	KRA biotisch (mg /Pkm)	KRA fossil (mg/ Pkm)	KRA metallisch (mg/Pkm)	KRA mineralisch (mg/Pkm)
Pkw	127,6	5.566,2	40.792,8	5.806,3
Schienennahverkehr	8,9	316,1	3.146,3	298,8
Straßen-/Stadt-/U-Bahn	15,5	494,4	7.446,8	623,2
Nahlinienbus	36,4	1.904,8	9.538,1	1.763,8
Kraftrad	66,2	4.554,8	15.715,8	2.971,8
Moped	60,2	4.139,7	14.283,4	2.700,9
Fahrrad	42,0	2.897,1	5.381,5	1.705,4
Flug (international)	0,6	36,7	222,2	32,2
Flug (national)	0,4	25,6	154,9	22,4
Schienerfernverkehr	3,6	167,0	1.284,1	140,0
Fernlinienbus	11,4	599,1	3.005,2	556,2

Tabelle 84: KRA-Ergebnisse der Fahrzeuge (Güterverkehr)

	KRA biotisch (mg /tkm)	KRA fossil (mg/ tkm)	KRA metallisch (mg/tkm)	KRA mineralisch (mg/tkm)
Lkw 3,5-7,5 t	137,0	6.737,7	37.589,5	6.176,5
Lkw >7,5-12t	72,8	3.602,0	19.917,9	3.248,8
Lkw >12t	64,7	3.208,5	17.702,3	2.868,7

	KRA biotisch (mg /tkm)	KRA fossil (mg/ tkm)	KRA metallisch (mg/tkm)	KRA mineralisch (mg/tkm)
Last-/Sattelzug >34-40t	40,3	2.004,1	11.025,0	1.782,1
Flug (international)	3,5	217,2	1.313,2	190,2
Flug (national)	2,5	154,6	934,8	135,4
Schienengüterverkehr	25,6	459,5	3.528,7	422,6
Binnenschiff	7,8	413,1	2.897,8	437,6

Tabelle 85: KRA-Ergebnisse der Fahrzeuge (sonstige)

	KRA biotisch (mg /km)	KRA fossil (mg/ km)	KRA metallisch (mg/km)	KRA mineralisch (mg/km)
Lieferwagen	176,0	7.877,7	60.640,9	8.057,4
Lastenrad	63,3	3.969,9	16.579,3	2972,1

Tabelle 86: Übersicht über die verwendeten KRA Faktoren (mit Quellenangaben)

	KRA_biotisch	KRA_fossil	KRA_metallisch	KRA_mineralisch	Einheit	Quelle
Alkydharz, weiss, 60 % in Lösemittel	0,55	1,98	12,00	24,15	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Aluminium (Guss)	0,03	2,03	1,99	1,19	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Aluminium (Walz-)	0,06	4,88	4,15	2,18	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Asphalt	0,04	1,14	0,27	0,56	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Bauholz	0,99	0,01	0,00	0,09	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Baukies	0,00	0,00	0,00	1,05	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)

	KRA_biotisch	KRA_fossil	KRA_metallisch	KRA_mineralisch	Einheit	Quelle
Beton	0,00	0,02	0,03	1,02	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Betonstahl	0,01	0,95	5,70	0,85	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Blei	0,03	0,44	6,38	2,60	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Chrom	0,24	11,58	15,91	5,69	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Elektronik für Steuereinheit	0,67	14,85	214,22	15,61	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Elektronik, clamp collector	0,44	4,79	126,20	7,14	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Elektronik, integrierter Schaltkreis	12,99	585,11	11.350,69	362,47	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Elektronik, sonstige	0,67	14,85	214,22	15,61	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Elektronik, Widerstand	0,87	18,17	237,53	34,21	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Elektronische Komponente, passiv	1,04	25,44	791,44	35,35	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Glas	0,02	0,31	0,18	1,35	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Glasfaser	0,02	1,03	0,41	2,11	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Graphit	0,03	2,32	0,10	1,68	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Gummi	0,06	2,01	0,62	0,65	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Gusseisen	0,01	0,86	3,80	0,72	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
HDPE	0,00	1,70	0,02	0,11	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Keramik	0,02	0,34	0,92	2,71	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Kobalt	0,15	3,58	657,20	55,03	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Kupfer	0,17	1,54	175,66	2,85	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
LDPE	0,00	1,70	0,02	0,11	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)

	KRA_biotisch	KRA_fossil	KRA_metallisch	KRA_mineralisch	Einheit	Quelle
Lithium	0,02	10,10	0,00	3,18	kg/kg	ProBas
Magnesium	0,17	15,67	2,11	17,67	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Mangan	0,04	1,48	18,30	1,79	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Messing	0,14	1,74	128,67	3,64	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Naturstein	0,00	0,23	0,02	1,45	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Neodymoxid	0,49	15,70	76,22	9,06	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Nickel	0,18	3,94	89,63	35,55	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Palladium	28,18	2.563,41	25.050,09	10.191,79	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Platin	0,00	7.665,95	161.138,86	2.804,79	kg/kg	(Giegrich et al., 2012)
PVC	0,00	1,23	0,02	0,77	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Sand	0,00	0,00	0,00	1,05	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Schwefelsäure	0,00	0,17	0,15	0,08	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Silizium	1,02	4,19	0,33	4,53	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Stahl (niedriglegiert)	0,02	0,87	6,31	0,80	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Tantal	5,48	121,47	9.218,43	91,01	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Titan	0,27	13,16	92,46	187,87	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Zement	0,00	0,07	0,02	1,47	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Zink	0,01	0,16	7,66	2,57	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Zinn	0,22	8,78	1.171,20	3,13	kg/kg	(Dittrich et al., 2019)
Benzin	0,01	0,03	0,00	0,00	kg/MJ	(Helms et al., 2016)

	KRA_biotisch	KRA_fossil	KRA_metallisch	KRA_mineralisch	Einheit	Quelle
Diesel	0,02	0,03	0,00	0,00	kg/MJ	(Helms et al., 2016)
Erdgas (fossil)	0,00	0,96	0,03	0,03	kg/m3	(Dittrich et al., 2019)
Kerosin	0,02	0,03	0,00	0,00	kg/MJ	- (wie Diesel)
Strom (DE 2010)	0,02	0,28	0,02	0,07	kg/kWh	(Dittrich et al., 2019)

A.7 Datengrundlagen und Ergebnisse Flächenverbrauch

Tabelle 87: Verkehrsfläche und Allokationsfaktoren (temporäre Flächenbelegung)

Flächennutzung	Verkehrsfläche total [m ²]	Allokationsfaktor temp. Flächenbelegung und Fahrleistung [%]																			
		Fahrrad	Pedelec	Lastenrad	Pkw	FLBus	Rbus	Lbus	KKR	KR	LNF	SNF	SSU	SPNV	SPFV	SGV	BS	LPVN	LPVI	LGVN	LGVI
Flughafen, Start-/Landebahn	5.127.675	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	65	1	7
Flughafen, Vorfeld	21.936.404	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	65	1	7
Flughafen, Schultern	2.051.070	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	65	1	7
Flughafen, unversiegelt	113.089.851	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	65	1	7
Flughafen, Terminals	933.737	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	66	1	16
Flughafen, sonstiges	2.721.323	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	66	1	16
Flüsse, Uferstreifen	4.906.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
Kanäle & Fahrrinnen Flüsse	309.924.230	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
Kanäle und Flüsse, Schleusen	521.600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0

Flächennutzung	Verkehrsfläche total [m²]	Allokationsfaktor temp. Flächenbelegung und Fahrleistung [%]																				
Kanäle und Flüsse, Binnenhäfen	11.631.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
Gleis, eingleisig, ABS	5.244.751	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61	13	26	0	0	0	0	0	
Gleis, zweigleisig, ABS	84.599.294	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61	13	26	0	0	0	0	0	
Gleis, eingleisig HGS	510.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	52	30	18	0	0	0	0	0	
Gleis, zweigleisig HGS	35.059.922	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	52	30	18	0	0	0	0	0	
Gleis, eingleisig, andere	184.127.215	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73	5	22	0	0	0	0	0	
Gleis, zweigleisig, andere	108.528.407	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73	5	22	0	0	0	0	0	
Gleis, eingleisig, SSU	21.520.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	
Schiene, Gebäude & Energieversorgung	26.428.461	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	66	9	21	0	0	0	0	0	
Schiene, Oberleitung und Signaltechnik	1.376.204	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	63	14	22	0	0	0	0	0	
Schiene, Gleisbett	439.589.849	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	53	14	19	0	0	0	0	0	
Straße, Bundesautobahn	332.820.736	0	0	0	76	0	0	0	0	1	6	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Flächennutzung	Verkehrsfläche total [m ²]	Allokationsfaktor temp. Flächenbelegung und Fahrleistung [%]																			
Straße, Bundesstraße	325.106.831	1	0	0	82	0	0	0	0	1	6	10	0	0	0	0	0	0	0	0	
Straße, Landstraße	547.881.567	0	0	0	86	0	0	1	0	2	7	4	0	0	0	0	0	0	0	0	
Straße, Kreisstraße	504.918.613	1	1	0	84	0	0	1	0	2	7	5	0	0	0	0	0	0	0	0	
Straße, Gemeindestraße	2.568.010.770	2	1	0	82	0	0	1	0	1	6	7	0	0	0	0	0	0	0	0	
Straße, sonstige	143.660.497	1	0	0	78	0	0	0	0	1	6	13	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabelle 88: Verkehrsfläche und Allokationsfaktoren (Standfläche der Fahrzeuge und Fahrleistung)

Flächennutzung	Verkehrsfläche total [m ²]	Allokationsfaktor Standfläche und Fahrleistung [%]																			
		Fahrrad	Pedelec	Lastenrad	Pkw	FLBus	Rbus	Lbus	KKR	KR	LNF	SNF	SSU	SPNV	SPFV	SGV	BS	LPVN	LPVI	LGVN	LGVI
Flughafen, Start-/Landebahn	5.127.675	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	65	1	7
Flughafen, Vorfeld	21.936.404	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	65	1	7
Flughafen, Schultern	2.051.070	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	65	1	7
Flughafen, unversiegelt	113.089.851	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	65	1	7
Flughafen, Terminals	933.737	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	65	1	7
Flughafen, sonstiges	2.721.323	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	65	1	7
Flüsse, Uferstreifen	4.906.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
Kanäle & Fahrrinnen Flüsse	309.924.230	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
Kanäle und Flüsse, Schleusen	521.600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
Kanäle und Flüsse, Binnenhäfen	11.631.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
Gleis, eingleisig, ABS	5.244.751	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	22	43	0	0	0	0	0

Flächennutzung	Verkehrsfläche total [m ²]	Allokationsfaktor Standfläche und Fahrleistung [%]																			
		Fahrrad	Pedelec	Lastenrad	PKW	FLBus	Rbus	Lbus	KKR	KR	LNF	SNF	SSU	SPNV	SPFV	SGV	BS	LPVN	LPVI	LGVN	LGVI
Gleis, zweigleisig, ABS	84.599.294	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	22	43	0	0	0	0	0
Gleis, eingleisig HGS	510.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	46	27	0	0	0	0	0
Gleis, zweigleisig HGS	35.059.922	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	46	27	0	0	0	0	0
Gleis, eingleisig, andere	184.127.215	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	10	41	0	0	0	0	0
Gleis, zweigleisig, andere	108.528.407	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	10	41	0	0	0	0	0
Gleis, eingleisig, SSU	21.520.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Schiene, Gebäude & Energieversorgung	26.428.461	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	42	15	39	0	0	0	0	0
Schiene, Oberleitung und Signaltechnik	1.376.204	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	38	23	37	0	0	0	0	0
Schiene, Gleisbett	439.589.849	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	32	22	32	0	0	0	0	0
Straße, Bundesautobahn	332.820.736	0	0	0	66	0	1	0	0	0	6	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Straße, Bundesstraße	325.106.831	0	0	0	75	0	1	1	0	0	6	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Flächennutzung	Verkehrsfläche total [m ²]	Allokationsfaktor Standfläche und Fahrleistung [%]																			
		Fahrrad	Pedelec	Lastenrad	Pkw	FLBus	Rbus	Lbus	KKR	KR	LNF	SNF	SSU	SPNV	SPFV	SGV	BS	LPVN	LPVI	LGVN	LGVI
Straße, Landstraße	547.881.567	0	0	0	82	0	0	1	0	1	8	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Straße, Kreisstraße	504.918.613	0	0	0	81	0	0	1	0	1	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Straße, Gemeindestraße	2.568.010.770	0	0	0	77	0	1	2	0	0	7	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Straße, sonstige	143.660.497	0	0	0	71	0	0	1	0	0	6	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 89: Flächennutzung: Allokation temporäre Flächenbelegung und Fahrleistung^{15 16}

Flächennutzung: Allokation temp. Flächenbelegung und Fahrleistung			Fahrrad	Pedelec	Lasten- rad	Pkw	FLBus	Rbus	Lbus	KKR	KR	LNF	SNF	SSU	SPNV	SPFV	SGV	BS	LPVN	LPVI	LGVN	LGVI
	Occupation, traffic area, road network	m ² *a	2,06 E-03	1,68E-03	2,96E-02	2,22E-03	8,87E-05	9,70E-05	3,94E-04	2,90E-03	3,49E-03	2,24E-02	3,45E-04	0	0	0	0	0	0	7,30E-04	7,63E-05	4,74E-03
Occupation, traffic area, rail network	m ² *a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,52E-04	3,69E-03	6,49E-04	5,01E-04	0	0	0	0	0
Occupation, traffic area, rail/road embankment	m ² *a	8,56E-07	9,99E-06	2,74E-05	3,74E-05	1,59E-06	1,88E-06	3,07E-06	4,03E-06	3,35E-05	2,40E-04	9,57E-06	3,65E-04	1,58E-03	2,76E-04	2,14E-04	8,84E-05	2,83E-03	2,96E-04	1,84E-02	6,08E-04	0
Occupation, industrial area	m ² *a	0	0	0	5,18E-05	5,60E-06	3,87E-06	1,54E-06	0	3,02E-05	4,33E-04	2,24E-05	7,31E-05	3,16E-04	5,54E-05	4,29E-05	2,19E-04	6,45E-05	1,05E-05	3,89E-04	4,57E-05	0
Occupation, river, artificial	m ² *a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,58E-03	0	0	0	0	0
Transformation, to traffic area, road network	m ²	2,06E-03	1,68E-03	2,96E-02	2,22E-03	8,87E-05	9,70E-05	3,94E-04	2,90E-03	3,49E-03	2,24E-02	3,45E-04	0	0	0	0	0	0	7,30E-04	7,63E-05	4,74E-03	1,56E-04

¹⁵ Nomenklatur in der Tabelle aus der ecoinvent Datenbank. Übersetzt bedeutet occupation Landnutzung und transformation Landnutzungsänderung.

¹⁶ Die Zahlendarstellung erfolgt aus Gründen der Lesbarkeit im Format 1E-3. Dies ist gleichbedeutend mit 1*10⁻³.

Flächennutzung: Allokation temp. Flächenbelegung und Fahrleistung	Transformation, to traffic area, rail network		Transformation, to traffic area, rail/road embankment		Transformation, to industrial area		Transformation, from unspecified	
	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²
Fahrrad	0	8,56E-07	0	8,56E-07	0	8,56E-07	2,06E-03	0
Pedelec	0	9,99E-06	0	9,99E-06	0	9,99E-06	1,69E-03	0
Lastenrad	0	2,74E-05	0	2,74E-05	0	2,74E-05	2,97E-02	0
Pkw	0	3,74E-05	5,18E-05	3,74E-05	5,18E-05	3,74E-05	2,31E-03	5,18E-05
FLBus	0	1,59E-06	5,60E-06	1,59E-06	5,60E-06	1,59E-06	9,59E-05	5,60E-06
Rbus	0	1,88E-06	3,87E-06	1,88E-06	3,87E-06	1,88E-06	1,03E-04	3,87E-06
Lbus	0	3,07E-06	1,54E-06	3,07E-06	1,54E-06	3,07E-06	3,99E-04	1,54E-06
KKR	0	4,03E-06	0	4,03E-06	0	4,03E-06	2,90E-03	0
KR	0	3,35E-05	3,02E-05	3,35E-05	3,02E-05	3,35E-05	3,55E-03	3,02E-05
LNF	0	2,40E-04	4,33E-04	2,40E-04	4,33E-04	2,40E-04	2,30E-02	4,33E-04
SNF	0	9,57E-06	2,24E-05	9,57E-06	2,24E-05	9,57E-06	3,77E-04	2,24E-05
SSU	8,52E-04	3,65E-04	7,31E-05	3,65E-04	7,31E-05	3,65E-04	1,29E-03	7,31E-05
SPNV	3,69E-03	1,58E-03	3,16E-04	1,58E-03	3,16E-04	1,58E-03	5,58E-03	3,16E-04
SPFV	6,49E-04	2,76E-04	5,54E-05	2,76E-04	5,54E-05	2,76E-04	9,81E-04	5,54E-05
SGV	5,01E-04	2,14E-04	4,29E-05	2,14E-04	4,29E-05	2,14E-04	7,58E-04	4,29E-05
BS	0	8,84E-05	2,09E-04	8,84E-05	2,09E-04	8,84E-05	2,98E-04	2,09E-04
LPVN	0	2,83E-03	6,45E-05	2,83E-03	6,45E-05	2,83E-03	3,63E-03	6,45E-05
LPVI	0	2,96E-04	1,05E-05	2,96E-04	1,05E-05	2,96E-04	3,83E-04	1,05E-05
LGVN	0	1,84E-02	3,89E-04	1,84E-02	3,89E-04	1,84E-02	2,35E-02	3,89E-04
LGVI	0	6,08E-04	4,57E-05	6,08E-04	4,57E-05	6,08E-04	8,10E-04	4,57E-05

Tabelle 90: Flächennutzung: Allokation Standfläche der Fahrzeuge und Fahrleistung^{17 18}

Flächennutzung: Allokation Standfläche und Fahrleistung		Fahrrad	Pedelec	Lasten- rad	Pkw	FLBus	Rbus	Lbus	KKR	KR	LNF	SNF	SSU	SPNV	SPFV	SGV	BS	LPVN	LPVI	LGVN	LGVI
Occupation, traffic area, road network	m ² *a	3,30E-04	2,20E-04	5,94E-03	2,13E-03	1,57E-04	1,75E-04	7,06E-04	4,29E-04	1,54E-03	2,52E-02	6,23E-04	0	0	0	0	0	7,30E-04	7,63E-05	4,74E-03	1,56E-04
Occupation, traffic area, rail network	m ² *a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,52E-04	2,36E-03	1,14E-03	9,12E-04	0	0	0	0	0
Occupation, traffic area, rail/road embankment	m ² *a	1,08E-07	1,08E-06	4,36E-06	3,37E-05	2,91E-06	3,48E-06	6,01E-06	3,86E-07	1,29E-05	2,53E-04	1,67E-05	3,65E-04	1,01E-03	4,86E-04	3,89E-04	8,84E-05	2,83E-03	2,96E-04	1,84E-02	6,08E-04
Occupation, industrial area	m ² *a	0	0	0	4,47E-05	1,01E-05	6,97E-06	3,02E-06	0	1,10E-05	4,41E-04	3,57E-05	7,31E-05	2,02E-04	9,73E-05	7,80E-05	2,19E-04	9,34E-05	9,76E-06	6,06E-04	2,00E-05
Occupation, river, artificial	m ² *a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,58E-03	0	0	0	0
Transformation, to traffic area, road network	m ²	3,30E-04	2,20E-04	5,94E-03	2,13E-03	1,57E-04	1,75E-04	7,06E-04	4,29E-04	1,54E-03	2,52E-02	6,23E-04	0	0	0	0	0	7,30E-04	7,63E-05	4,74E-03	1,56E-04

¹⁷ Nomenklatur in der Tabelle aus der ecoinvent Datenbank. Übersetzt bedeutet occupation Landnutzung und transformation Landnutzungsänderung.

¹⁸ Die Zahlendarstellung erfolgt aus Gründen der Lesbarkeit im Format 1E-3. Dies ist gleichbedeutend mit 1*10⁻³.

A.8 Detailergebnisse Umweltkosten

Tabelle 91: Detailergebnisse zu den Umweltkosten 2017 (Personenverkehr), in €-ct/Pkm

	Betrieb (TTW)	Energiebereitstellung (WTT)	Fahrzeuge	Infrastruktur	Fläche	Total
Pkw	3,16	0,65	1,23	0,22	0,39	5,66
Schiennahverkehr	0,60	0,97	0,04	0,38	0,46	2,46
Straßen-/Stadt-/U-Bahn	0,00	1,31	0,15	0,40	0,17	2,03
Nahlinienbus	1,96	0,35	0,24	0,08	0,13	2,75
Kraftrad	3,51	0,66	0,67	0,09	0,28	5,22
Moped	5,16	0,31	0,61	0,07	0,08	6,22
Fahrrad	0,00	0,00	0,29	0,01	0,06	0,36
Pedelec	0,00	0,09	0,44	0,01	0,04	0,58
Reisebus	0,73	0,14	0,10	0,01	0,03	1,01
Flug (international)	4,65	0,47	0,01	0,06	0,02	5,21
Flug (national)	6,62	0,97	0,00	0,06	0,15	7,81
Schienerfernverkehr	0,04	0,71	0,02	0,36	0,22	1,36
Fernlinienbus	0,59	0,13	0,08	0,01	0,03	0,83

Tabelle 92: Detailergebnisse zu den Umweltkosten 2017 (Güterverkehr), in €-ct/tkm

	Betrieb (TTW)	Energiebereitstellung (WTT)	Fahrzeuge	Infrastruktur	Fläche	Total
Lkw 3,5-7,5 t	12,79	2,30	1,37	0,54	0,12	17,12
Lkw >7,5-12t	8,19	1,60	0,57	0,35	0,12	10,84
Lkw >12t	4,82	0,94	0,46	0,17	0,12	6,52
Last-/Sattelzug >34-40t	1,83	0,41	0,28	0,15	0,12	2,79
Flug (international)	28,50	3,22	0,04	0,65	0,03	32,44
Flug (national)	47,76	9,29	0,03	0,65	0,97	58,69
Schienen-güterverkehr	0,08	0,37	0,07	0,32	0,18	1,01
Binnenschiff	1,30	0,15	0,07	0,26	0,05	1,84

Tabelle 93: Detailergebnisse zu den Umweltkosten 2017 (sonstige), in €-ct/Fzkm

	Betrieb (TTW)	Energiebereitstellung (WTT)	Fahrzeuge	Infrastruktur	Fläche	Total
Lieferwagen	8,06	1,36	1,70	0,23	0,77	12,12
Lastenrad	0,000	0,184	0,533	0,016	0,071	0,804