

TEXTE

32/2025

Abschlussbericht

Umwelt und Klimaschutz in der Logistik

**Potenziale umweltorientierter Logistikkonzepte zur
Reduzierung der Emissionen des Güterverkehrs (PULK)**

von:

Mirjam Opitz, Sascha Rosentritt, Martin Schwemmer, Alexander Köhler

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Nürnberg

Michel Allekotte, Frank Dünnebeil, Julius Jöhrens, Claudia Kämper

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, Heidelberg

Clemens Brauer, Jonathan Köhler

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe

Arnd Bernsmann, Daniela Kirsch

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 32/2025

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3719 58 103 0
FB001628

Abschlussbericht

Umwelt und Klimaschutz in der Logistik

Potenziale umweltorientierter Logistikkonzepte zur
Reduzierung der Emissionen des Güterverkehrs (PULK)

von

Mirjam Opitz, Sascha Rosentritt, Martin Schwemmer,
Alexander Köhler

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Nürnberg

Michel Allekotte, Frank Dünnebeil, Julius Jöhrens, Claudia
Kämper

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
gGmbH, Heidelberg

Clemens Brauer, Jonathan Köhler

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
ISI, Karlsruhe

Arnd Bernsmann, Daniela Kirsch

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML,
Dortmund

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

Durchführung der Studie:

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS
Nordostpark 84
90411 Nürnberg

Abschlussdatum:

Oktober 2024

Redaktion:

Fachgebiet I 2.1 Umwelt und Verkehr
Martyn Douglas

DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7539>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, März 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen*Autoren

Kurzbeschreibung: Potenziale umweltorientierter Logistikkonzepte zur Reduzierung der Emissionen des Güterverkehrs (PULK)

Ziel des Projektes war es, bestehende Maßnahmen einer nachhaltigen Logistik zu identifizieren und Konzepte abzuleiten, welche bereits eine positive Umweltwirkung ausweisen können oder durch gezielte Anpassung Potenziale dafür haben. Die ganzheitliche Betrachtung im Projekt schließt die Zusammenführung von Erkenntnissen aus Theorie und Praxis ein und stützt sich auf Ergebnisse aus quantitativen und qualitativen Methoden und Auswertungen. Sowohl nationale als auch internationale Erfahrungswerte und Modelle wurden in die Betrachtungen einbezogen.

Auf Basis einer Literaturrecherche wurde eine Vielzahl möglicher Bausteine nachhaltiger Logistikkonzepte identifiziert. Für eine Auswahl dieser Bausteine werden anschließend deren Wirkungen auf die THG-Emissionen und ausgewählte Luftschadstoffemissionen quantifiziert. Um eine Vergleichbarkeit der betrachteten Maßnahmen zu gewährleisten, wurde eine einheitliche Bilanzierungsstruktur festgelegt.

Abstract: Potentials of environmentally oriented logistics concepts to reduce emissions from freight transport (PULK)

The aim of the project was to identify existing measures and derive concepts that can already demonstrate a positive environmental impact or have the potential for it through targeted adjustments. The holistic approach in the project involves synthesizing insights from theory and practice, relying on results from quantitative and qualitative methods and evaluations. Both national and international experiences and models were considered in the analyses.

Based on a literature review, a variety of potential components of sustainable logistics concepts were identified. For a selection of these components, their effects on greenhouse gas (GHG) emissions and selected air pollutant emissions are subsequently quantified. To ensure comparability of the considered measures, a uniform accounting structure was established.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	13
Zusammenfassung	14
I. Hintergrund & Zielsetzung	14
II. Trends und Rolle der Nachhaltigkeit in der Logistik	15
III. Handlungsansätze nachhaltiger Logistik	16
IV. Wirkungsquantifizierung nachhaltiger Handlungsoptionen der Logistik	19
Summary	25
I. Background & Objectives	25
II. Trends and the role of sustainability in logistics	26
III. Approaches to Sustainable Logistics	27
IV. Impact quantification of sustainable options for action in logistics	30
1 Einleitung	35
1.1 Hintergrund & Zielsetzung	35
1.2 Zielsetzung & Methodischer Rahmen des Projekts	36
1.3 Existierende Methoden zur Emissionsbilanzierung in der Logistik	37
2 Trends und Rolle der Nachhaltigkeit in der Logistik	39
2.1 Trends in der Logistikbranche und mögliche Effekten auf die Emissionen	39
2.2 Nachtlogistik	44
2.3 Stellenwert der Nachhaltigkeit in der deutschen Logistikbranche	46
3 Handlungsansätze nachhaltiger Logistik	48
3.1 Übersicht der Literaturrecherche	48
3.2 Definition von Maßnahmen für die weitere Untersuchung	49
3.3 Systematisierungsansätze für die Maßnahmen	55
3.4 Ergebnisse der Befragung zum Status quo und der weiteren Entwicklung nachhaltiger Logistikkonzepte	70
3.5 Zwischenfazit qualitative Untersuchung	73
4 Methodik zur Wirkungs- und Potentialabschätzung nachhaltiger Handlungsoptionen der Logistik	76
4.1 Untergliederung der Logistikbereiche für die Wirkungsabschätzung	76
4.2 Bilanzraum und zeitlicher Bezug	81
4.3 Vorgehen zur Wirkungsquantifizierung	82

4.4	Gesamtwirtschaftliche Rückkopplungen nach ASTRA	86
4.5	Referenzszenario.....	87
5	Wirkungsquantifizierung nachhaltiger Handlungsoptionen der Logistik.....	102
5.1	Handlungsfeld „Prozessoptimierung“	104
5.2	Handlungsfeld „Technologische Effizienz“	121
5.3	Handlungsfeld „Antriebskonzepte“	137
5.4	Handlungsfeld „Lagerei“	145
5.5	Internalisierung externer Kosten	158
5.6	Mögliche Rebound-Effekte	161
5.7	Gesamtübersicht und Fazit zur Wirkungsquantifizierung.....	162
6	Maßnahmensteckbriefe	172
6.1	Effizienz Antrieb/Fahrzeug.....	172
6.2	Alternative Antriebe.....	179
6.3	Letzte Meile.....	184
6.4	Verlagerung Bahn.....	189
6.5	Optimierung Umschlag	191
6.6	Effizienz Lager	192
6.7	Lagernutzung.....	195
6.8	(Digitale) Prozessoptimierung.....	195
6.9	Finanzielle Anreize	200
6.10	Transportbedarf	201
6.11	Verpackung	207
7	Quellenverzeichnis	209
Anhang	215
A1.	Güterabteilungen nach NST-2007 Ebene 1	215
A2:	Detaillierte Verkehrsmengen Straße 2030.....	216
A3:	Gesamtemissionen im Referenzjahr 2030	249
A4:	Quellenverzeichnis der Literaturrecherche	251

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Einschätzung der befragten Unternehmen, welche Ziele aus ihrer heutigen Sicht mit einer nachhaltigen Logistik erreicht werden können.....	16
Abbildung 2:	THG-Vermeidung – Gesamtübersicht alle Maßnahmen (WTW)	20
Abbildung 3:	NO _x -Vermeidung – Gesamtübersicht alle Maßnahmen (TTW)	21
Figure 4:	Assessment of surveyed companies regarding goals that can be achieved with sustainable logistics from their current perspective	27
Figure 5:	GHG avoidance - overview of all measures (WTW).....	31
Figure 6:	NO _x avoidance - overview of all measures (TTW)	32
Abbildung 7:	Schematische Darstellung der Projektübersicht (AP1-5)	36
Abbildung 8:	Integration von existierenden Standards und Methoden im GLEC-Framework	37
Abbildung 9:	Identifizierte Geräuschquellen beim Anlieferprozess an der Filiale.....	45
Abbildung 10:	Einschätzung der befragten Unternehmen, welche Ziele aus ihrer heutigen Sicht mit einer nachhaltigen Logistik erreicht werden können.....	47
Abbildung 11:	Beispielhafte Darstellung eines Maßnahmensteckbriefes	54
Abbildung 12:	Darstellung einer Logistikkette.....	62
Abbildung 13:	Vereinfachte Darstellung unterschiedlicher Versorgungsstufen am Beispiel der Lebensmittelbranche	63
Abbildung 14:	Darstellung eines vereinfachten Supply Chain Modells	64
Abbildung 15:	Zuordnung von Einzelmaßnahmen zu Netzwerken des Nah-, Regional- und Fernverkehrs	69
Abbildung 16:	Zuordnung von Maßnahmen, die allen Netzwerktypen des Nah-, Regional- und Fernverkehr zuordenbar sind	70
Abbildung 17:	Einschätzung der befragten Unternehmen, in welchen Bereichen bereits Maßnahmen für eine nachhaltige Logistik umgesetzt werden	71
Abbildung 18:	Einschätzung der Unternehmen, welche Bereiche aus ihrer Sicht zukünftig die höchste Relevanz für ihr Unternehmen haben.....	72
Abbildung 19:	Einschätzung der Unternehmen, welche wichtigen Stellhebel der Politik zur Unterstützung der Einführung nachhaltiger Logistikkonzepte sie in ihrem Unternehmen sehen.....	73
Abbildung 20:	Untergliederung der Logistik – Bereiche	77
Abbildung 21:	Untergliederung des Transports nach Verkehrsträger und Güterabteilung.....	78
Abbildung 22:	Untergliederung des Straßentransports.....	79
Abbildung 23:	Untergliederung des Bereichs Lagerei.....	80
Abbildung 24:	Bilanzgrenzen des Transports.....	82

Abbildung 25:	Pyramide der nachhaltigen Mobilität.....	83
Abbildung 26:	Schematische Darstellung des Zusammenhangs relevanter Berechnungsgrößen – Bereich Transport.....	84
Abbildung 27:	Schematische Darstellung von Zwischengrößen für die Berechnung – Lagerei.....	86
Abbildung 28:	Modell-Struktur von ASTRA-D.....	86
Abbildung 29:	THG-Emissionen und Transportleistung im Jahr 2030 des Referenzszenarios.....	87
Abbildung 30:	NO _x -Emissionen im Jahr 2030 des Referenzszenarios – Gesamtübersicht.....	88
Abbildung 31:	Vorgehen bei der Differenzierung des Straßengüterverkehrs.....	89
Abbildung 32:	THG-Emissionen Straße 2030 im Referenzszenario differenziert nach Distanzklasse und Lkw-Größenklasse.....	90
Abbildung 33:	Antriebstechnologien im Straßengüterverkehr im Jahr 2030 des Referenzszenarios.....	92
Abbildung 34:	Lagerflächen im Referenzszenario, Jahr 2030.....	98
Abbildung 35:	THG-Emissionen Lager im Jahr 2030 des Referenzszenarios.....	101
Abbildung 36:	Betrachtete Maßnahmen für die THG-Bilanzierung.....	103
Abbildung 37:	THG-Vermeidung – Prozessoptimierung.....	105
Abbildung 38:	Leerfahrten im Straßengüterverkehr im europäischen Vergleich 2020.....	115
Abbildung 39:	THG-Vermeidung – Technologische Effizienz.....	123
Abbildung 40:	THG-Vermeidung – Antriebskonzepte.....	139
Abbildung 41:	THG-Vermeidung – Lagerei.....	146
Abbildung 42:	Grundelemente der Intralogistik.....	147
Abbildung 43:	Effekte von Effizienzsteigerungen von Lkw auf den Modal Split.....	161
Abbildung 44:	THG-Vermeidung – Gesamtübersicht alle Maßnahmen (WTW).....	163
Abbildung 45:	THG-Vermeidung – Gesamtübersicht alle Maßnahmen inkl. theoretisches Maximalpotenzial (WTW).....	164
Abbildung 46:	NO _x -Vermeidung – Gesamtübersicht alle Maßnahmen (TTW).....	165
Abbildung 47:	NO _x -Vermeidung – Gesamtübersicht alle Maßnahmen inkl. theoretisches Maximalpotenzial (TTW).....	166
Abbildung 48:	THG Vermeidung für Verkehr und Lagerei bei Berücksichtigung aller Maßnahmen.....	170
Abbildung 49:	NO _x Vermeidung für Verkehr und Lagerei bei Berücksichtigung aller Maßnahmen.....	171

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der Ebenen und Zuordnung abgeleiteter Maßnahmen als Zwischenergebnis	17
Table 2:	Overview of the levels and assignment of derived measures as an interim result	28
Tabelle 3:	Übersicht relevanter Megatrends und deren möglichen Effekte auf Emissionen.....	39
Tabelle 4:	Übersicht relevanter Nebentrends und deren möglichen Effekte auf Emissionen	41
Tabelle 5:	Übersicht relevanter regionaler Trends und deren möglichen Effekte auf Emissionen	43
Tabelle 6:	Übersicht der Zuordnungskategorien der Sekundärquellen	48
Tabelle 7:	Übersicht bewerteter Kriterien der Maßnahmen und deren Ausprägungen.....	49
Tabelle 8:	Übersicht der Ebenen und Zuordnung abgeleiteter Maßnahmen als Zwischenergebnis	50
Tabelle 9:	Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Effizienz Antrieb/Fahrzeug“	51
Tabelle 10:	Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Alternative Antriebe“	51
Tabelle 11:	Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Letzte Meile“	52
Tabelle 12:	Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Verlagerung Bahn“	52
Tabelle 13:	Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Optimierung Umschlag“	52
Tabelle 14:	Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Effizienz Lager“	52
Tabelle 15:	Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Lagernutzung“	53
Tabelle 16:	Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „(Digitale) Prozessoptimierung“	53
Tabelle 17:	Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Finanzielle Anreize“	53
Tabelle 18:	Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Transportbedarf“	53
Tabelle 19:	Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Finanzielle Anreize“	54
Tabelle 20:	Übersicht potenzieller Daten zur Abdeckung von Zwischengrößen	57
Tabelle 21:	Ableitung von Maßnahmen aus der Zuordnung entlang der Supply Chain	60

Tabelle 22:	THG-Emissionen Straße 2030 im Referenzszenario differenziert nach Güterabteilung.....	91
Tabelle 23:	THG-Emissionen Schiene 2030 im Referenzszenario differenziert nach Güterabteilung.....	93
Tabelle 24:	Zuordnung der Güterabteilungen zur Ladungsart bei der Binnenschifffahrt.....	94
Tabelle 25:	THG-Emissionen Binnenschifffahrt 2030 im Referenzszenario differenziert nach Güterabteilung.....	95
Tabelle 26:	Transportleistung und THG-Emissionen Seegewässer 2030 im Referenzszenario differenziert nach Güterabteilung.....	97
Tabelle 27:	Nutzenergiebedarfe von Kühlslagern im Jahr 2030 des Referenzszenarios.....	99
Tabelle 28:	Nutzenergiebedarfe von beheizten Lagern im Jahr 2030 des Referenzszenarios.....	99
Tabelle 29:	Nutzenergiebedarfe von unbeheizten Lagern im Jahr 2030 des Referenzszenarios.....	100
Tabelle 30:	Anteile der Wärmeerzeuger und deren Wirkungsgrade im Jahr 2030 des Referenzszenarios.....	100
Tabelle 31:	Prozessoptimierung: Intelligente Telematik und Datenaustausch.....	107
Tabelle 32:	Prozessoptimierung: Verlagerung Straße auf Schiene.....	109
Tabelle 33:	Prozessoptimierung: Echtzeit optimierte Frachtrouten in urbanen Räumen.....	110
Tabelle 34:	Prozessoptimierung: Paketlieferung per E-Lastenrad.....	111
Tabelle 35:	Prozessoptimierung: Senkung der Retourenquote von Paketen.....	113
Tabelle 36:	Prozessoptimierung: Vermeidung von Leerfahrten.....	116
Tabelle 37:	Prozessoptimierung: Nachtlogistik.....	118
Tabelle 38:	Prozessoptimierung: Slow Steaming in der Hochseeschifffahrt.....	120
Tabelle 39:	Technologische Effizienz: Lkw Effizienz Aerodynamik.....	124
Tabelle 40:	Technologische Effizienz: Lang-Lkw.....	126
Tabelle 41:	Technologische Effizienz: Lkw: Mehrkammer-Fahrzeuge.....	127
Tabelle 42:	Technologische Effizienz: Langzug 740mPlus.....	129
Tabelle 43:	Technologische Effizienz: Binnenschiff: Energie-Effizienz.....	130
Tabelle 44:	Technologische Effizienz: Optimierte Verpackungssysteme.....	131
Tabelle 45:	Technologische Effizienz: Flugzeug: optimierte Triebwerke.....	132
Tabelle 46:	Technologische Effizienz: Seeschiff: optimierte Hydrodynamik.....	134
Tabelle 47:	Technologische Effizienz: Seeschiff: Zugdrachen.....	135
Tabelle 48:	Technologische Effizienz: Seehäfen: Landstrom.....	137
Tabelle 49:	Antriebskonzepte: Elektro-Lkw.....	141
Tabelle 50:	Antriebskonzepte: Oberleitungs-Lkw (rein elektrisch).....	142
Tabelle 51:	Antriebskonzepte: Seeschiff: Erdgasantrieb mit fossilem LNG.....	144
Tabelle 52:	Lagerei: Optimierung Intralogistik - effiziente Inhouse Logistik.....	148
Tabelle 53:	Lagerei: Optimierung Gebäudehülle - Gebäudestandards für Lagerlogistik.....	150

Tabelle 54:	Lagerei: Verladetore - Effiziente Temperatursteuerung in Gebäuden	151
Tabelle 55:	Lagerei: Optimierte Beleuchtung - Intelligente Beleuchtungssteuerung.....	153
Tabelle 56:	Lagerei: Einsatz von Wärmepumpen in Lagern.....	155
Tabelle 57:	Lagerei: Photovoltaik auf Lagerhallen	157
Tabelle 58:	Änderungen an den Transporten durch die Maßnahme „Anpassung Lkw-Maut“	159
Tabelle 59:	Anpassung Lkw-Maut	160
Tabelle 60:	Änderungen bei der Verkehrsleistung durch Effizienzsteigerungen beim Lkw	162
Tabelle 61:	Rebound-Effekt durch Effizienzsteigerungen beim Lkw.....	162

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
BEV	Elektrofahrzeug mit Batterie
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
GA	Güterabteilung
GHG	Green house gas
GLEC	Global Logistics Emissions Council
GLT	Großladungsträger
GNSS	Global Navigation Satellite System (globales Navigationssatellitensystem)
HBEFA	Handbook Emission Factors for Road Transport
ICEV	Fahrzeug mit Verbrennungskraftmaschine
KLT	Kleinladungsträger
LED	Light-emitting diode (Leuchtdiode)
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LNG	Liquid Natural Gas (Flüssigerdgas)
LPG	Liquid Petroleum Gas (komprimiertes Erdgas)
mKr	Masse Kraftstoff (Energienmenge)
NO_x	Stickstoffoxid
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PM	Feinstaub
PtL	Power-to-Liquid (Elektrische Energie zur Herstellung flüssiger Kraftstoffe)
PULK	Potenziale umweltorientierter Logistikkonzepte zur Reduzierung der Emissionen des Güterverkehrs
PV	Photovoltaik
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SO₂	Schwefeldioxid
TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
THG	Treibhausgase
tkm	Tonnenkilometer
TraViMo	Transportstrom-Visualisierungs-Modell
TREMOD	Transport Emission Model
TTW	Tank-to-Wheel (vom Tank bis zum Rad)
WTT	Well-to-Tank (Bereitstellung der Antriebsenergie)
WTW	Well-to-Wheel (Prozesskette der Bereitstellung der Antriebsenergie)
zulGG	Zulässiges Gesamtgewicht

Zusammenfassung

I. Hintergrund & Zielsetzung

Die Logistik ist ein Wirtschaftsbereich, der allein in Deutschland mit rund 3,3 Mio. Erwerbstätigen ein Umsatzvolumen von rund 280 Mrd. € erwirtschaftet. Gemessen am nationalen Bruttoinlandsprodukt stellt die Umsatzgröße der Logistik einen Anteil von rund 8 % dar (2021). Auch innerhalb der Logistik, die für die Beförderung von über 4 Mrd. Tonnen allein in Deutschland verantwortlich ist, stellt sich die Frage, welcher Beitrag zu Umwelt- und Klimaschutz durch die Anwendung neuer Konzepte zur Verkehrsverlagerung, Verkehrsvermeidung, Effizienzsteigerung und durch den Einsatz neuer technologischer Lösungen geleistet werden kann. Im Auftrag des Umweltbundesamts wurde deshalb im Forschungsprojekt „Umwelt- und Klimaschutz in der Logistik: Potenziale umweltorientierter Logistikkonzepte zur Reduzierung der Emissionen des Güterverkehrs (PULK)“ an einem validen Maßnahmenkatalog für nachhaltige Logistik geforscht.

Das Projekt hatte zum Ziel, bestehende Maßnahmen zur nachhaltigen Logistik zu identifizieren und daraus Konzepte abzuleiten, die entweder bereits eine positive Umweltwirkung zeigen oder durch gezielte Anpassungen das Potenzial dazu haben. Dabei wurde eine ganzheitliche Betrachtung vorgenommen, die Erkenntnisse aus Theorie und Praxis zusammenführt und sich auf Ergebnisse aus quantitativen und qualitativen Methoden stützt. In die Betrachtungen flossen sowohl nationale als auch internationale Erfahrungswerte und Modelle ein. Die Analyse von Faktoren und deren Wirkungsgraden erfolgt mittels Betrachtung wesentlicher generischer Bestandteile der Logistik (Supply Chain und Netzwerk). Die Anwendbarkeit der abgeleiteten Maßnahmen wird auf Makro- (Gütergruppen- bzw. Branchenebene) sowie Mikroebene (Unternehmensebene) betrachtet. Es wird analysiert, welche Möglichkeiten für eine erfolgreiche Implementierung in der Praxis bestehen und wie Maßnahmen ggf. ausgestaltet werden müssen, um sowohl einen möglichst großen Einfluss auf Klima und Umwelt als auch eine hohe Akzeptanz bei Unternehmer*innen und Unternehmen zu erzielen. Zudem sollen die Ergebnisse wichtige Erkenntnisse für eine zukünftige Entwicklung erfolgreicher Förder- und Unterstützungsmaßnahmen zur Stärkung nachhaltiger Logistik in der Praxis darbieten.

Es existieren verschiedene Methoden zur Bilanzierung von Emissionen, aus denen sich in weiterführender Analyse Emissionsminderungspotenziale ermitteln lassen. Mit Fokus auf die Logistik ist das GLEC-Framework zu nennen, welches einen Leitfaden für Verlagerer, Spediteure und Logistikdienstleister zur Berichterstattung über Emissionen aus Logistikoperationen bietet. Die aktuelle ISO-Norm 14083 orientiert sich stark an den Vorgaben der GLEC. Sowohl der Norm als auch dem Framework ist zum einen gemein, dass sie sich auf einzelne Logistikketten von Unternehmen fokussieren und keine kompletten Branchen in den Blick nehmen, zum anderen bei internationalen Transporten keine Aufteilung auf einzelne Länder vornehmen. So ist zumindest eine branchenspezifische Betrachtung limitiert und die Bewertung von Emissionsminderungspotenzialen von unternehmensübergreifenden Logistikkonzepten und allgemeinen Trends kann nicht hinreichend abgebildet werden.

Um in diesem Vorhaben eine unternehmensübergreifende, systemische Betrachtung des Güterverkehrs zu ermöglichen, wurde das Emissionsberechnungsmodell „TREMODO“ (Transport Emission Model) eingesetzt, das u. a. den Güterverkehr in Deutschland abbildet. Wesentliche Größen dieses Modells sind Verkehrs- und Fahrleistungen, Energieverbräuche und die zugehörigen Klimagas- und Luftschadstoffemissionen. Um zusätzlich die transportierten Güter, die zum Einsatz kommenden Logistikkonzepte und Netzwerktypen sowie die wirtschaftliche Struktur der Logistikbranche zu berücksichtigen, sind des weiteren Erkenntnisse und Analysen aus dem UBA-Projekt „TraViMo“ (Transportstrom-Visualisierungs-Modell) in das vorliegende

Projekt eingeflossen. Das Ergebnis vereint somit einen bottom-up-Ansatz für die Wirkungsbetrachtung einzelner Logistikkonzepte mit dem top-down-Ansatz eines nationalen Emissionsinventars.

II. Trends und Rolle der Nachhaltigkeit in der Logistik

Trends in der Logistikbranche und mögliche Effekten auf die Emissionen

Ausgehend von den 10 Megatrends der Logistik gemäß dem Fraunhofer IIS, Arbeitsgruppe für Supply Chain Services wurde eine Trendanalyse hinsichtlich potenzieller positiver und negativer Wirkungen auf Umwelt und Nachhaltigkeitsziele durchgeführt. Weitere Trends wurden mittels strukturierter Desk Research ergänzt, sodass insgesamt 11 Megatrends, 8 Nebentrends sowie 2 regionale Trends erfasst wurden. Im Unterschied zu Nebentrends (z. B. Frachtraumoptimierung) und regionalen Trends (z. B. Steigerung Zustellquote) geht man bei Megatrends davon aus, dass diese deutlich länger andauern werden und Auswirkungen auf mehrere Lebensbereiche haben (beispielsweise der Demografische Wandel). Sie sind global relevant, wenn auch in regional unterschiedlich starker Ausprägung. Trends (hier Nebentrends genannt) wirken im Vergleich dazu auf nur einen Lebensbereich, bzw. auf einen spezifischen Markt und klingen in der Regel schneller ab als Megatrends. Zudem werden in diesem Projekt regionale Trends berücksichtigt, die stark abhängig von regionalen Gegebenheiten und Regulierungen sind. Erkenntnisse daraus fließen in eine spätere Hochrechnung der Potenziale von Maßnahmen ein.

Stellenwert der Nachhaltigkeit in der deutschen Logistikbranche

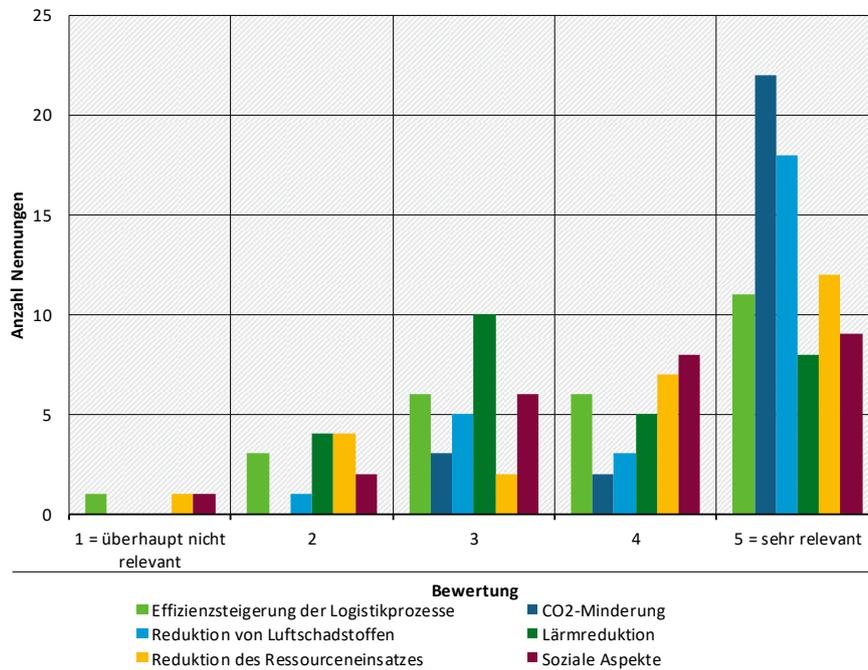
Im Rahmen des Projektes stand die Frage im Fokus, welchen Beitrag die Anwendung von Konzepten der nachhaltigen Logistik zum Umwelt- und Klimaschutz leisten kann. Die Akzeptanz der Konzepte bei beteiligten Akteuren*innen und praxistaugliche Ausgestaltungsmöglichkeiten sind dabei essenziell für eine erfolgreiche Implementierung und Voraussetzungen für das Design wirkungsvoller Fördermaßnahmen. Daher wurde projektbegleitend eine Online-Umfrage unter Logistik-Unternehmen durchgeführt, in welcher folgende Themenkomplexe abgefragt wurden:

- ▶ Einschätzung des Status quo zu Nachhaltigkeit in der Logistik
- ▶ Einschätzung der Relevanz von verschiedenen Maßnahmenbereichen
- ▶ Auswirkungen von Maßnahmenbereichen auf die Unternehmensabläufe und
- ▶ Umsetzungshemmnisse und Unterstützungsbedarf in den Maßnahmenbereichen.

Die folgende Abbildung 1 zeigt als Auszug der Umfrageergebnisse die Einschätzung der befragten Unternehmen dahingehend, welche Ziele aus ihrer heutigen Sicht mit einer nachhaltigen Logistik erreicht werden können. Dabei zeigt sich, dass die Minderung von CO₂-Emissionen und Luftschadstoffen am häufigsten als sehr relevant eingeschätzt wurde.

Abbildung 1: Einschätzung der befragten Unternehmen, welche Ziele aus ihrer heutigen Sicht mit einer nachhaltigen Logistik erreicht werden können

Welche Ziele können Ihrer Meinung nach allgemein mit einer nachhaltigen Logistik erreicht werden?



n = 27

Quelle: Unternehmensbefragung

III. Handlungsansätze nachhaltiger Logistik

Übersicht der Literaturrecherche

Im Rahmen einer detaillierten Literaturrecherche wurden Suchanfragen auf unterschiedlichen Plattformen nach ausgewählten Schlagworten durchgeführt, weitere Quellen aus bestehenden Literatursammlungen der beteiligten Forschungseinrichtungen wurden zusätzlich ergänzt. Somit wurden insgesamt 198 Quellen mit Veröffentlichungsdatum ab 2010 gesammelt, mit dem Ziel, ein umfassendes Bild von Ansätzen grüner Logistik bei gleichzeitig größtmöglicher Aktualität zu zeichnen. Insgesamt konnten so 92 einzelne Maßnahmen extrahiert werden. Durch eine anschließende Aggregation der Maßnahmen auf zwei Detaillierungsebenen wurde eine systematische Aufbereitung und Untersuchung von Einflussgrößen für die anschließende Bilanzierung vorbereitet, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht der Ebenen und Zuordnung abgeleiteter Maßnahmen als Zwischenergebnis

Ebene 1 (Anzahl zugeordneter Maßnahmen)	Ebene 2 (Anzahl zugeordneter Maßnahmen)	
Alternative Antriebe (10)	Lkw-Antrieb (5) Schiff-Antrieb (2)	Flugzeug-Antrieb (1) Zug-Antrieb (2)
Effizienz Antrieb/Fahrzeug (17)	Lkw-Effizienz (5) Lkw-Ladefläche (4) Zug-Ladefläche (1) Schiff-Effizienz (2)	Green Shipping (1) Slow Steaming (2) Flugzeug-Effizienz (2)
Effizienz Lager (10)	Bauweise (2) Energie Lager (6)	Ressourceneinsatz Lager (2) Prozessoptimierung Lager (2)
Finanzielle Anreize (3)	Maut (1) Internalisierung (1)	Green Sourcing (1)
Lagernutzung (1)	Standortwahl (1)	
Letzte Meile (9)	B2C/B2B (2) E-Bikes (2)	Nachtlogistik (2) Urbane Logistik (3)
Optimierung Umschlag (3)	Green Ports (2)	Umschlag (1)
(digitale) Prozessoptimierung (12)	Digitalisierung (1) Organisation intern (1) Organisation extern (4)	Crowd Logistics (1) Routing (4) Telematik (1)
Transportbedarf (17)	Auslastung Fahrzeug (2) Green Sourcing (2) Organisation extern (2) Organisation intern (1)	Prozessoptimierung Produktion (2) Lieferbedingung (2) Logistikfläche (4) Standortwahl (3)
Verhalten (3)	Mitarbeitertraining (3)	
Verlagerung Bahn (3)	Kombination ÖPNV und Logistik (1)	Verlagerung Straße-Schiene- Schiff (2)
Verpackung (4)	Verpackung (4)	

Die Zuordnung der Maßnahmen zu den jeweiligen Ebenen ist den Maßnahmensteckbriefen in Kapitel 6 zu entnehmen. In diesen Steckbriefen sind die Einzelmaßnahmen detailliert beschrieben, qualitativ bewertet und ihre Wirkungsbereiche und Umweltwirkungen dargestellt. Außerdem sind adressierte Stakeholder und ein entsprechender Zeithorizont aufgeführt.

Zusammengefasst kann beobachtet werden, dass der Großteil identifizierter Maßnahmen dem Bereich Transport zugeordnet werden kann, wobei besonders Maßnahmen für Straßenverkehre stark vertreten sind. Weiterhin konzentrieren sich aktuell verfolgte Maßnahmen im Bereich Beschaffung vor allem auf die gezielte Auswahl von Lieferanten abhängig von deren CO₂-Performance und deren Standortnähe. Konzepte zur Steigerung der Fahrzeugeffizienz und alternative Antriebe sind über alle Verkehrsträger hinweg vertreten.

Zwischenfazit zu den identifizierten Maßnahmen

- ▶ Maßnahmen im Bereich Beschaffung konzentrieren sich vor allem auf die gezielte Auswahl von Lieferanten abhängig von deren CO₂-Performance und deren Standortnähe.
- ▶ Der Großteil identifizierter Maßnahmen kann dem Bereich Transport zugeordnet werden, wobei besonders Maßnahmen für Straßenverkehre stark vertreten sind. Zudem werden Potenziale in der Organisationszentralisierung von Transporten und der Internalisierung von Umweltkosten der Fahrzeuge eines Transportes gesehen. Konzepte zur Steigerung der Fahrzeugeffizienz und alternative Antriebe sind über alle Verkehrsträger hinweg vertreten.
- ▶ Maßnahmen aus dem Bereich Verpackung haben vor allem Effekte auf Transportgewicht und einsetzbare Fahrzeugklassen.
- ▶ Ein weiterer Bereich ist die Lagerlogistik, in der Umweltwirkungen durch Effizienzsteigerung und Energieeinsparungen abgeleitet werden können.

Zwischenfazit zur Bewertungsmethodik

- ▶ Umweltorientierte Logistikkonzepte und Maßnahmen werden in der verfügbaren Literatur häufig in Form von Fallstudien analysiert, ohne die Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle zu untersuchen oder die Ergebnisse in eine systemische Betrachtung einzubetten. Eine Reihe von Maßnahmen kann mangels Datengrundlage daher nicht quantifiziert werden.
- ▶ Aufgrund der Verfügbarkeit geeigneter Daten zur Bilanzierung wurde für die Bilanzierung der Maßnahmen die Zuordnung von Maßnahmen zu Nah-, Regional- und Fernverkehren vorgenommen. Eine eindeutige Zuordnung einer Maßnahme zu nur einem Distanzbereich ist allerdings nicht immer möglich. Weiterhin gibt es Maßnahmen, die in allen Netzwerktypen des Nah-, Regional- und Fernverkehrs eingesetzt werden können (z. B. optimierte Prozesse, Einführung von Nutzungsgebühren oder Routenoptimierungen).
- ▶ Potenziale zur Emissionsminderung, die sich aus optimierten Beschaffungsprozessen ergeben, sind nicht direkt quantifizierbar. Die Höhe der indirekten Auswirkung auf Transport- und Lagerprozesse kann nur durch Annahmen und Experteneinschätzungen qualitativ beschrieben werden. Mit Blick auf die Verabschiedung des Lieferkettengesetzes und der ESG-Reporting-Pflicht der EU fällt dem Bereich nachhaltige Beschaffungsprozesse aber zunehmende Bedeutung zu.
- ▶ Bei vielen der identifizierten Maßnahmen herrscht eine hohe Innovationsdynamik, gerade bei digitalisierten bzw. softwaregestützten Lösungen. Daher ist in regelmäßigen Abständen eine erneute Recherche nach neuen Konzepten und eine Aktualisierung der bekannten Maßnahmen erforderlich, um den aktuellen Stand der Technik und der Umsetzung zu erfassen.

Zwischenfazit zur Einschätzung der Unternehmen

- ▶ In den Bereichen *Optimierung der Fahrzeugauslastung*, *Optimierung von Logistikprozessen* und *Optimierung der Fahrzeugeffizienz* werden von den befragten Unternehmen bereits am häufigsten Maßnahmen umgesetzt. Zukünftig die höchste Relevanz wird bei der Einführung *alternativer Antriebe* gesehen.
- ▶ Der Ausbau der Infrastruktur und der Abbau bürokratischer Hürden werden von den befragten Unternehmen als wichtigste Stellhebel der Politik gesehen. Aber auch

niedrigschwellige Stellhebel wie der Aufbau von Austauschmöglichkeiten und die Verbesserung von Information und Vernetzung im Bereich der nachhaltigen Logistik werden als wichtig eingeschätzt.

- ▶ Insgesamt war die Bereitschaft der Unternehmen zur Teilnahme an einer umfassenden Befragung zu umweltorientierten Logistikkonzepten sehr verhalten. Bei gleichzeitig hoher Differenzierung der Antwortmöglichkeiten sind die Befragungsergebnisse zwar indikativ, aber nicht quantitativ belastbar.

IV. Wirkungsquantifizierung nachhaltiger Handlungsoptionen der Logistik

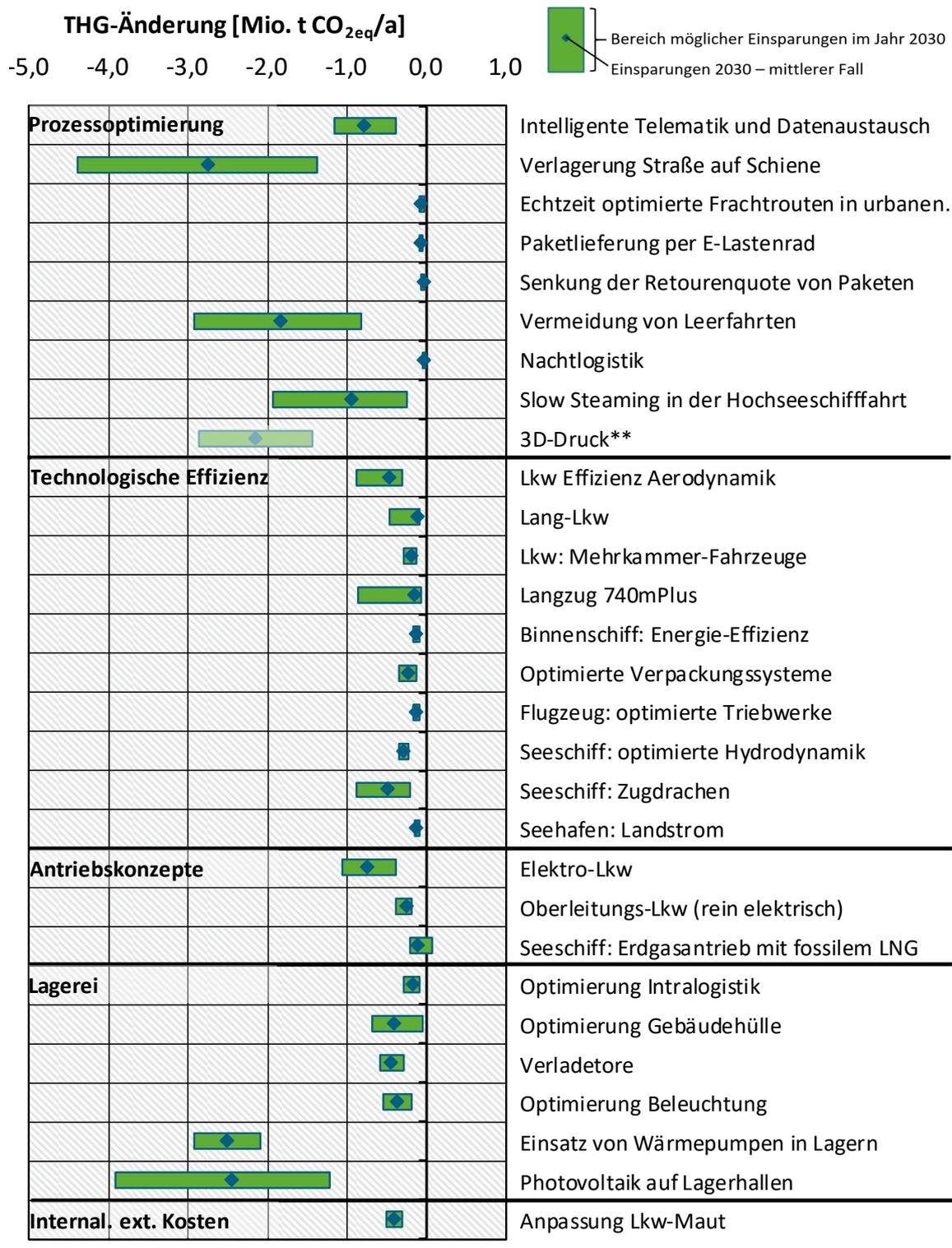
Für eine Auswahl der o.g. Maßnahmen wurden anschließend deren Wirkungen auf die THG-Emissionen und ausgewählte Luftschadstoffemissionen quantifiziert. Dabei wird die Wirkung einer Maßnahme als Differenz zwischen einem System mit Implementierung der jeweiligen Maßnahme und einem Referenzsystem ohne Implementierung der Maßnahme definiert. Für beide Systeme gelten dieselben räumlichen und zeitlichen Bilanzgrenzen. Das Bilanzierungsmodell als Ganzes ist in die drei Bereiche Verpackung, Transport und Lagerei gegliedert, eine weitergehende Differenzierung innerhalb der Logistikbereiche orientiert sich primär an den verfügbaren Statistiken und etablierten Modellen.

Bei der Wirkungsquantifizierung der Maßnahmen wurde auf das Betrachtungsjahr 2030 fokussiert. Bei entsprechendem Ambitionsgrad besteht eine realistische Aussicht, Konzepte nachhaltiger Logistik bis zu diesem Jahr zumindest in Teilen einzuführen. Zudem stellt dieses Jahr eine wichtige Wegmarke bei den nationalen Klimaschutzzielen dar. Die im Trend ohne zusätzliche Maßnahmen zu erwartenden Randbedingungen im Jahr 2030 (z. B. Verkehrsmengen oder Emissionsfaktoren) bilden sowohl die Grundlage für die Abschätzung der spezifischen Maßnahmenwirkungen als auch für die Hochrechnung der jeweiligen deutschlandweiten Wirkpotentiale.

Der Gütertransport auf Straße, Schiene und Binnenwasserwegen wird nach dem Territorialprinzip bilanziert. Das heißt, dass Verkehrsmengen, direkte Emissionen und Energieverbräuche innerhalb der deutschen Grenzen betrachtet werden. Bei der Seeschifffahrt und beim Flugverkehr werden jeweils die Hälfte der von und nach Deutschland stattfindenden internationalen Transporte bilanziert, um die Auswirkungen der internationalen wirtschaftlichen Verflechtungen auf die Emissionsbilanz abzubilden. Im Bereich Lagerei wird lediglich der Betrieb (TTW und WTT) der Lager bilanziert. Eine Bilanzierung des Aufwands für die Errichtung der Lager wäre zwar wünschenswert, ist im Rahmen dieses Projekts aufgrund der fehlenden Datenverfügbarkeit aber nicht umsetzbar.

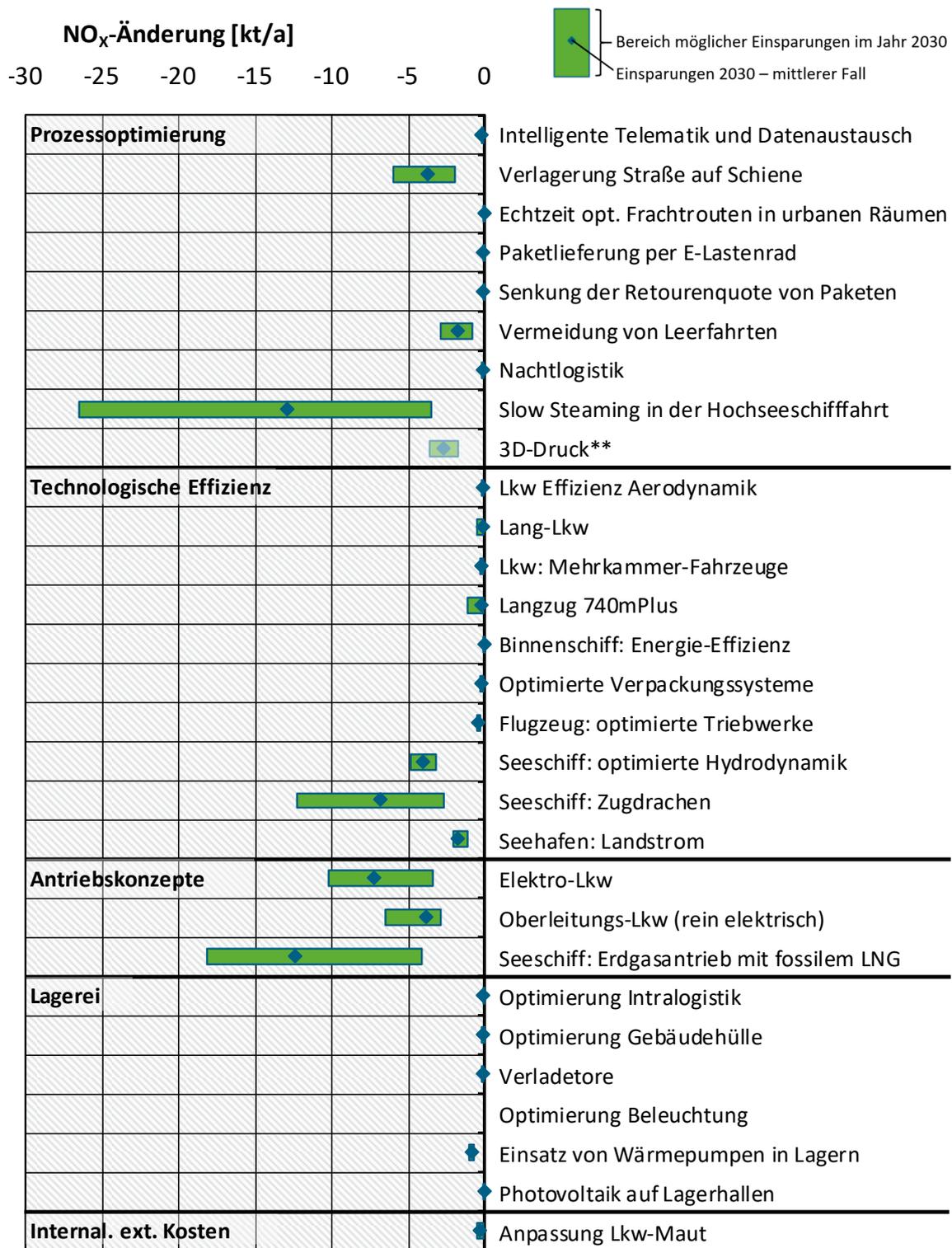
Für die Wirkungsquantifizierung mussten zunächst diejenigen Maßnahmen ausgewählt werden, für die eine hinreichende Datengrundlage vorliegt und deren Bilanzierung keinen gravierenden methodischen Hürden begegnet. So ergibt sich schlussendlich eine deutliche Reduktion auf 28 Maßnahmen, gegliedert nach fünf Handlungsfeldern. Die Ergebnisse aus der Quantifizierung der betrachteten Maßnahmen aller Handlungsfelder sind in Abbildung 2 (THG-Emissionen) und Abbildung 3 (NO_x-Emissionen) zusammengefasst.

Abbildung 2: THG-Vermeidung – Gesamtübersicht alle Maßnahmen (WTW)



Quellen: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkung: *Beim theoretischen Maximalpotenzial werden die Emissionsfaktoren und Verkehrsmengen des Jahres 2030 herangezogen. **Beim 3D-Druck sind lediglich die möglichen Auswirkungen auf den Transport und nicht auf die Produktion bilanziert. Die aus der Produktion resultierenden Emissionen könnten bei dezentralen Druckvorgängen höher sein als die zentrale Produktion zzgl. Lieferung.

Abbildung 3: NO_x-Vermeidung – Gesamtübersicht alle Maßnahmen (TTW)



Quellen: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkung: *Beim theoretischen Maximalpotenzial werden die Emissionsfaktoren und Verkehrsmengen des Jahres 2030 herangezogen. **Beim 3D-Druck sind lediglich die möglichen Auswirkungen auf den Transport und nicht auf die Produktion bilanziert. Die aus der Produktion resultierenden Emissionen könnten bei dezentralen Druckvorgängen höher sein als die zentrale Produktion zzgl. Lieferung.

In der Gesamtschau ist Folgendes festzustellen:

- ▶ Zwischen den betrachteten Maßnahmen zeigt sich bei den THG-Einsparpotentialen eine Bandbreite von zum Teil mehreren Größenordnungen. Dies geht neben unterschiedlichen spezifischen Einsparpotentialen vor allem darauf zurück, dass sich die potenziellen Wirkungsbereiche der Maßnahmen stark unterscheiden. So wirken einige Maßnahmen beispielsweise potenziell auf die gesamte Lkw-Flotte in Deutschland, während andere nur ein bestimmtes Segment innerhalb der urbanen Logistik adressieren.
- ▶ Die Quantifizierung der THG-Einsparpotentiale einzelner Maßnahmen ist in vielen Fällen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Trotz der vorgenannten großen Unterschiede in den berechneten Wirkpotentialen lassen sich aber dennoch robuste Schlussfolgerungen aus der Quantifizierung ziehen.
- ▶ Die mit Abstand höchsten THG-Einsparpotentiale im Transportbereich ergeben sich aus dem Verlagerungspotential von der Straße auf die Schiene (max. 4,4 Mio. t CO_{2eq}-Reduktion) sowie aus dem Potential zur Vermeidung von Lkw-Leerfahrten (max. 2,9 Mio. t CO_{2eq}-Reduktion).
 - Die Verlagerung auf die Schiene ist vor allem durch infrastrukturelle Restriktionen begrenzt, kann aber auch stark von digitalen Innovationen profitieren. Die positiven Effekte einer Verlagerung sind seit langem bekannt und vielfach in Studien diskutiert. Ein wirklich tiefgreifender Wandel hin zu einer Multimodalität in der Breite des Güterverkehrs bedarf einer grundlegenden Neuausrichtung der deutschen/europäischen Verkehrspolitik mit einer prioritären Förderung der schienengebundenen Güterverkehrsinfrastruktur.
 - Der Anteil an Leerfahrten im Güterverkehr liegt derzeit im europäischen Mittelfeld. Die Gründe für den hohen Leerfahrtenanteil sind vielschichtig. Dazu zählen auf der einen Seite eine häufige wettbewerbsbedingte Zurückhaltung bei der Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Logistikern, die kleinteilige Struktur der Transportbranche sowie die in Deutschland im internationalen Vergleich eher schleppende Digitalisierung. Weiterhin haben technische Anforderungen an den Transport, wie ein bestimmter Aufliebertyp, Einfluss auf den flexiblen Einsatz. Die Digitalisierung von Prozessen und verstärkte Kooperation unter den Logistikern könnte beispielsweise die Nutzung von Frachtenbörsen begünstigen, um Potentiale zur Auslastungsoptimierung zu heben.
- ▶ Im Bereich der Logistikimmobilien liegen die größten THG-Minderungspotentiale im Zeithorizont 2030 im Einsatz von Wärmepumpen (max. 2,9 Mio. t CO_{2eq}-Reduktion) sowie der Installation von Photovoltaikanlagen (max. 3,9 Mio. t CO_{2eq}-Reduktion) auf Logistikimmobilien. Wenn diese Technologien langfristig in weiten Teilen der Logistikimmobilien eingesetzt werden, können diese bilanziell energiepositiv werden. Beim Ausbau der Photovoltaik ergeben sich zudem starke Synergien mit der Einführung elektrischer Lkw (Lkw könnten auf diese Weise günstig mit erneuerbarem Strom versorgt werden, was ihre Einführung deutlich beschleunigen könnte).
- ▶ Die Einführung elektrischer Antriebe (BEV und Oberleitungs-Lkw) im Lkw-Bereich birgt vor allem langfristig erhebliches Klimaschutzpotential. Mittelfristig ist das Potential durch die begrenzte Geschwindigkeit der Flottenumschichtung sowie der Energiewende im Stromsektor begrenzt, so dass im Zeithorizont 2030 nur etwa 1,4 Mio. t CO_{2eq} WTW (10,5 Mio. t CO_{2eq} TTW) eingespart werden können. Elektromobilität sollte für die Logistik zumindest mittelfristig daher nicht als einzige Lösung verstanden werden.

- ▶ Der Bereich der fahrzeugseitigen Effizienz im Straßengüterverkehr enthält viele Einzelmaßnahmen, die jeweils für sich genommen nur vergleichsweise geringes THG-Minderungspotential aufweisen. Auch die Summe der Potentiale in diesem Bereich liegt deutlich hinter den anderen Bereichen. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass in der jüngsten Vergangenheit die Fahrwiderstände bereits deutlich verringert worden sind und somit das Potenzial auch schon deutlich ausgeschöpft ist. Für Effizienzmaßnahmen bei Schienenfahrzeugen und Schiffen konnte im Vergleich ein deutlich höheres Einsparpotenzial ermittelt werden.
- ▶ Bei Effizienzmaßnahmen, die die Betriebskosten vermindern, muss jedoch auch der Rebound-Effekt berücksichtigt werden: Die Kostenminderung pro Kilometer führt hierbei zu einem Anstieg der Fahrleistung. Den Ergebnissen zufolge verringern sich THG-Einsparungen durch dieselsparende Fahrzeugtechnologie um 20-40 %, wenn der Rebound-Effekt berücksichtigt wird.
- ▶ Konzepte im Bereich der Citylogistik (Einsatz von Lastenrädern, Nachtlogistik) zielen primär auf die Reduktion von Luftschadstoffemissionen und Lärm in Innenstädten und haben hierbei erhebliches Potential. Für die Reduktion von THG spielen sie allerdings nur eine untergeordnete Rolle.

Für die mittelfristige Dekarbonisierung des Seeschiff- und Flugverkehrs stehen derzeit alternative Kraftstoffe (biogen sowie strombasiert) im Zentrum der Diskussion. Die mittelfristige Verfügbarkeit solcher Kraftstoffe, ihre künftigen Preise sowie ihre Emissionsbilanz über den Lebenszyklus sind aktuell hochgradig unsicher und primär von Faktoren außerhalb der Logistik abhängig (geopolitische Entwicklungen, regulatorische Randbedingungen in Deutschland und Europa). Aufgrund dieser Unsicherheiten wurde in diesem Projekt davon abgesehen, Emissionsminderungspotentiale durch den Einsatz erneuerbarer Kraftstoffe zu quantifizieren.

Es gibt bei einigen Maßnahmen (insbesondere fahrzeugseitige Effizienzmaßnahmen und Einsatz digitaler Lösungen zur Reduktion des Fahrzeugenergieverbrauchs) eine hohe Unsicherheit bezüglich deren aktueller Verbreitung (Baseline), so dass auch die berechneten Potentiale in diesen Fällen mit zusätzlicher Unsicherheit behaftet sind.

Die hypothetische Kombination aller Maßnahmen (jeweils in Ausprägung „Max“) ergibt ein THG-Minderungspotential von ca. 18,3 Mio. t CO_{2eq} im Güterverkehr und 8,9 Mio. t CO_{2eq} bei den Logistikimmobilien, zusammen also 27,2 Mio. t CO_{2eq}. Das entspricht einer THG-Minderung gegenüber dem Referenzszenario für das Jahr 2030 um etwa 24 %. Direkte NO_x-Emissionen könnten um bis zu 81 kt reduziert werden, das Gros davon entfällt auf die Seeschifffahrt. Die für die Luftqualität in bewohnten Gebieten relevanten Verkehrsträger Straße, Schiene und Binnengewässer weisen eine maximale Reduktion von 27 kt NO_x auf. Die vorgenannte Abschätzung der kombinierten Wirkung aller Maßnahmen hat hypothetischen Charakter und gibt einen Hinweis, in welcher Größenordnung prinzipiell Minderungen möglich wären, wenn sehr schnell sehr ambitionierte Maßnahmen ergriffen würden. Selbst in diesem Falle wäre es aufgrund des langen Vorlaufs vieler Maßnahmen allerdings unwahrscheinlich, dass solche THG-Minderungen bis zum Jahr 2030 erzielt werden könnten. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Annahmen zu den Einzelpotenzialen von Maßnahmen teilweise mit hohen Unsicherheiten belegt sind. Zudem können in der Zukunft heute nicht quantifizierbare Entwicklungen eintreten, die die errechneten Potentiale ändern können (z. B. Rebound-Effekte). Mit Blick auf die kommenden Jahre bis 2030 können auch derzeit laufende Gesetzgebungsverfahren erhebliche Auswirkungen auf die Wirksamkeit bzw. Umsetzbarkeit einzelner Maßnahmenbereiche haben. So könnten sich auch dem Greening-Freight-Paket der

EU-Kommission beispielsweise relevante Verschiebungen bei der wettbewerblichen Ausgangsposition der Verkehrsträger Straße und Schiene ergeben.

Für die oben dargelegte Gesamtabstschätzung wurden grundlegende Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Maßnahmen berücksichtigt. Ein Beispiel für eine solche Wechselwirkung ist der Einsatz von Batterie-Lkw und gleichzeitig eine Reduktion der Lkw-Fahrleistung auf der Straße. So sind bspw. die absoluten Minderungspotenziale durch Vermeidung von Verkehren bei einer dieselbetriebenen Lkw-Flotte höher als bei einer elektrisch betriebenen. Das errechnete Gesamtpotenzial unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen ist somit ein Drittel niedriger als die Summe der Einzelpotenziale. Darüber hinaus sind in der Praxis weitere Wechselwirkungen zu erwarten, die auf der hier gewählten Betrachtungsebene nicht quantifiziert werden können.

Summary

I. Background & Objectives

The logistics sector, which alone in Germany employs around 3.3 million people, generates a turnover of approximately €280 billion. In terms of the national gross domestic product, the logistics turnover represents around 8 % (2021). Within the field of logistics, responsible for the transportation of over 4 billion tons in Germany alone, the question arises regarding the contribution to environmental and climate protection through the application of new concepts for modal shift, traffic avoidance, efficiency improvement, and the use of new technological solutions. On behalf of the German Environment Agency (UBA), the project "Environmental and Climate Protection in Logistics: Potentials of environmentally oriented logistics concepts for reducing emissions from freight transport (PULK)" was conducted to research a valid catalog of measures for sustainable logistics.

The project's goal was to identify existing measures and derive concepts that already demonstrate a positive environmental impact or have the potential for it. The holistic approach in the project involves integrating insights from both theory and practice and relies on results from quantitative and qualitative methods and evaluations. Both national and international experiences and models are considered in the assessments. The analysis of factors and their effectiveness is carried out by examining essential generic components of logistics (Supply Chain and network). The applicability of the derived measures is considered at both macro (product groups or industry level) and micro levels (company level). The analysis explores possibilities for successful implementation in practice and examines how measures may need to be shaped to achieve a significant impact on nature, climate, and the environment, as well as high acceptance among entrepreneurs and companies. Furthermore, the results aim to provide crucial insights for the future development of successful promotion and support measures to strengthen sustainable logistics in practice.

With a focus on logistics, the GLEC Framework should be mentioned, as it provides a guideline for shippers, carriers, and logistics service providers to report emissions from logistics operations. The current ISO 14083 standard closely aligns with the GLEC guidelines. Both the standard and the framework share the characteristic of focusing on individual logistics chains of companies rather than considering entire industries. Additionally, they do not allocate emissions to individual countries in the case of international transport. As a result, sector-specific analysis is limited, and the assessment of emission reduction potentials from cross-company logistics concepts and general trends cannot be adequately represented.

To enable a cross-company, systemic analysis of freight transport in this project, the emission calculation model "TREMODO" (Transport Emission Model) was used, which, among other things, represents freight transport in Germany. Key variables of this model include traffic and driving performance, energy consumption, and the associated greenhouse gas and air pollutant emissions. Additionally, to account for the transported goods, the logistics functions and network types in use, as well as the economic structure of the logistics industry, insights and analyses from the UBA project "TraViMo" (Transportstrom-Visualisierungs-Modell) were also incorporated into this project. The result thus combines a bottom-up approach for evaluating the impact of individual logistics concepts with the top-down approach of a national emissions inventory.

II. Trends and the role of sustainability in logistics

Trends in the logistics industry and potential effects on emissions

Building upon the 10 logistics megatrends identified by the Fraunhofer IIS, a trend analysis was conducted to assess potential positive and negative impacts on the environment and sustainability goals. Additional trends were supplemented through structured desk research, resulting in a total of 11 megatrends, 8 sub-trends, and 2 regional trends being captured. In contrast to sub-trends and regional trends, megatrends are assumed to persist for a significantly longer duration and have impacts across multiple aspects of life. They are globally relevant, albeit with varying degrees of regional significance. Trends (referred to as sub-trends here) impact, in comparison, only one aspect of life or a specific market and typically fade more quickly than megatrends. Furthermore, this project takes into account regional trends that are heavily influenced by regional conditions and regulations. Insights from these trends will be incorporated into a later projection of the potentials of measures.

Significance of Sustainability in the German Logistics Industry

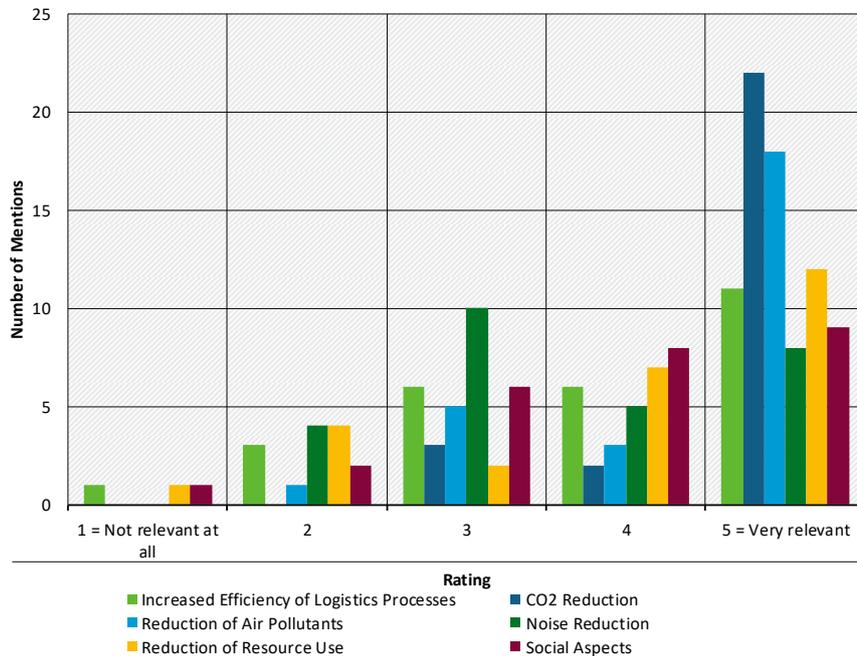
Within the scope of the project, the focus was on examining the contribution that the application of sustainable logistics concepts can make to environmental and climate protection. The acceptance of these concepts among involved stakeholders and practical design options are essential for successful implementation and prerequisites for designing effective support measures. Therefore, an online survey was conducted concurrently with the project among logistics companies, covering the following thematic areas:

- ▶ Assessment of the current status of sustainability in logistics
- ▶ Evaluation of the relevance of various areas of action
- ▶ Impacts of action areas on company operations
- ▶ Implementation barriers and support needs in the action areas

The following Figure 1, extracted from the survey results, illustrates the assessment of the surveyed companies regarding the goals that can be achieved with sustainable logistics from their current perspective. It reveals that the reduction of CO₂ emissions and air pollutants was most frequently rated as highly relevant.

Figure 4: Assessment of surveyed companies regarding goals that can be achieved with sustainable logistics from their current perspective

Question: In your opinion, what are some general goals that can be achieved with sustainable logistics?



n = 27

Source: Company Survey

III. Approaches to Sustainable Logistics

Overview of Literature Review

As part of a detailed literature review, search queries were conducted on various platforms using selected keywords, and additional sources from existing literature collections of participating research institutions were added. A total of 198 sources with publication dates from 2010 onwards were collected with the aim of providing a comprehensive overview of green logistics approaches while ensuring maximum relevance. In total, 92 individual measures were extracted. Through subsequent aggregation of the measures at two levels of detail, a systematic preparation and examination of influencing factors for the subsequent accounting were conducted, as shown in Table 1.

Table 2: Overview of the levels and assignment of derived measures as an interim result

Level 1 (Number of Assigned Measures)	Level 2 (Number of Assigned Measures)	
Alternative Drives (10)	Truck drive (5) Ship drive (2)	Aircraft drive (1) Train drive (2)
Efficiency Drive/Vehicle (17)	Truck Efficiency (5) Truck loading area (4) Train loading area (1) Ship Efficiency (2)	Green Shipping (1) Slow Steaming (2) Aircraft Efficiency (2)
Efficiency Storage (10)	Construction (2) Energy Storage (6)	Resource Utilization in Storage (2) Process Optimization in Storage (2)
Financial Incentives (3)	Toll (1) Internalisation (1)	Green Sourcing (1)
Storage Utilization (1)	Location choice (1)	
Last Mile (9)	B2C (2) E-Bikes (2)	Night logistics (2) Urban logistics (3)
Handling Optimization (3)	Green Ports (2)	Handling (1)
(Digital) Process Optimization (12)	Digitalization (1) Internal Organization (1) External Organization (4)	Crowd Logistics (1) Routing (4) Telematics (1)
Transport Demand (17)	Vehicle Utilization (2) Green Sourcing (2) External Organization (2) Internal Organization (1)	Production Process Optimization (2) Delivery conditions (2) Logistics area (4) Location choice (3)
Behavior (3)	Employee Training (3)	
Shift to Rail (3)	Combination of Public Transport and logistics (1)	Shift Road-Rail-Ship (2)
Packaging (4)	Packaging (4)	

The assignment of measures to the respective levels can be found in the measure profiles in Chapter 6. These profiles provide detailed descriptions, qualitative assessments, and illustrate the scope and environmental impacts of individual measures. Additionally, they include addressed stakeholders and an associated time horizon.

In summary, it can be observed that the majority of identified measures can be attributed to the transportation sector, with a particular emphasis on measures for road traffic. Currently pursued measures in the procurement sector mainly focus on the selective choice of suppliers based on their CO₂ performance and proximity. Concepts to enhance vehicle efficiency and alternative drives are represented across all modes of transport.

Interim conclusion on the identified measures

- ▶ Measures in the procurement area primarily focus on the selective choice of suppliers based on their CO₂ performance and proximity.
- ▶ The majority of identified measures can be attributed to the transportation sector, with a notable emphasis on measures for road traffic. Additionally, potentials are seen in the centralization of transport organizations and the internalization of environmental impacts of vehicles to account for the macroeconomic costs of transportation. Concepts for improving vehicle efficiency and alternative drives are represented across all modes of transport.
- ▶ Measures in the packaging domain primarily impact transport weight and vehicle types that can be used.
- ▶ Another area is warehouse logistics, where environmental effects can be derived through efficiency improvements and energy savings.

Interim Conclusion on the Evaluation Methodology

- ▶ Environmentally oriented logistics concepts and measures are often analyzed in available literature in the form of case studies without examining their transferability to other scenarios or embedding the results in a systemic context. Consequently, a number of measures cannot be quantified due to a lack of data.
- ▶ Due to the availability of suitable data for accounting, measures were categorized into short-distance, regional, and long-distance transport for the purpose of measuring their impacts. However, a clear assignment to only one distance category is not always possible. Furthermore, there are measures that can be applied in all network types of short-distance, regional, and long-distance transport (e.g., optimized processes, introduction of usage fees, or route optimization).
- ▶ Potentials for emission reductions resulting from optimized procurement processes are not directly quantifiable. The extent of the indirect impact on transportation and warehouse processes can only be qualitatively described through assumptions and expert assessments. With the introduction of the Supply Chain Act and the EU's ESG reporting obligation, sustainable procurement processes are gaining increasing importance.
- ▶ Many of the identified measures exhibit a high level of innovation dynamics, especially in the case of digitized or software-supported solutions. Therefore, regular research for new concepts and an update of known measures are necessary to capture the current state of technology and implementation.

Interim Conclusion on the Companies' Assessment

- ▶ In the areas of optimizing vehicle utilization, logistics process optimization, and improving vehicle efficiency, the surveyed companies already implement measures most frequently. The introduction of alternative drives is seen as having the highest relevance in the future.
- ▶ The expansion of infrastructure and the reduction of bureaucratic hurdles are considered by surveyed companies as the most important levers for government intervention. However, easily accessible levers such as establishing exchange opportunities and improving information and networking in the field of sustainable logistics are also deemed important.

- Overall, companies showed limited willingness to participate in a comprehensive survey on environmentally oriented logistics concepts. With a simultaneously high differentiation of response options, the survey results are indicative but not quantitatively robust.

IV. Impact quantification of sustainable options for action in logistics

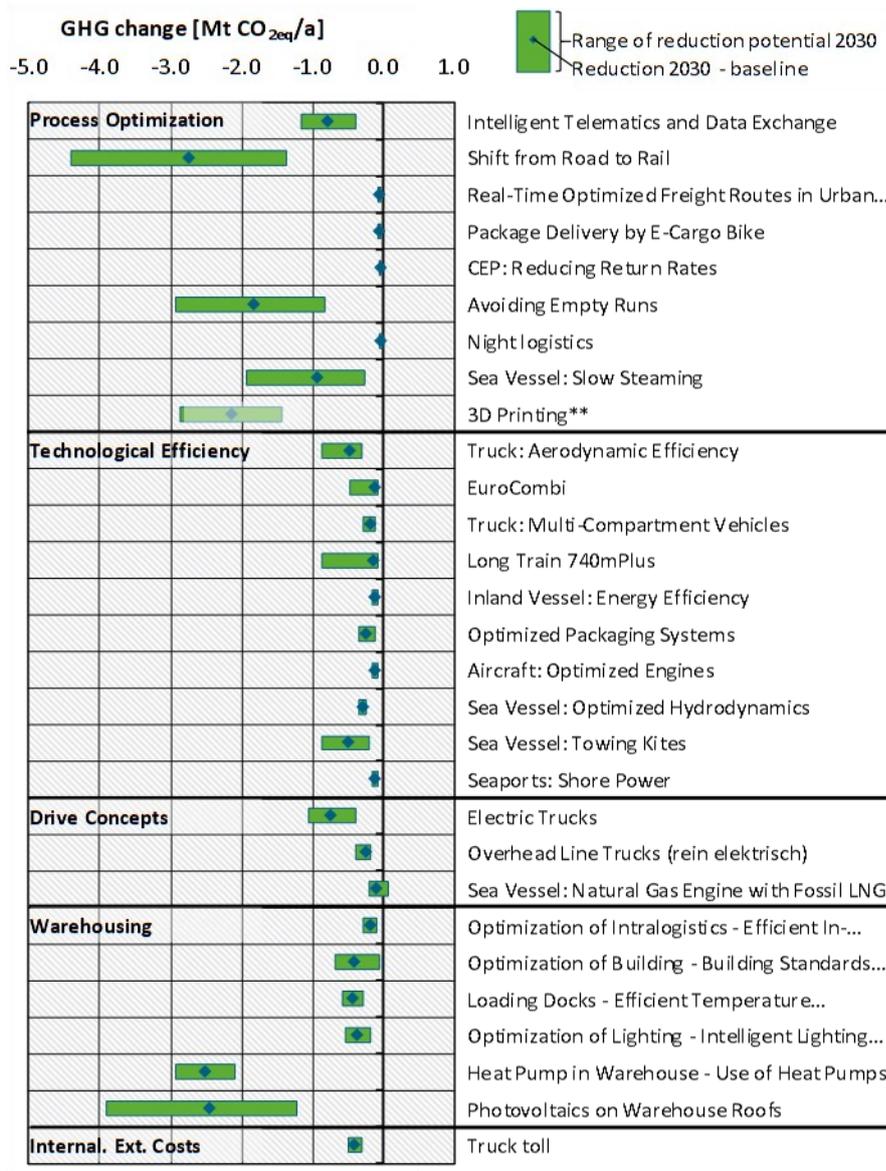
For a selection of the aforementioned measures, their effects on greenhouse gas (GHG) emissions and selected air pollutant emissions were subsequently quantified. The impact of a measure is defined as the difference between a system with the implementation of the respective measure and a reference system without the implementation of the measure. Both systems use the same spatial and temporal accounting boundaries. The accounting model as a whole is divided into three areas: packaging, transport, and warehousing. Further differentiation within the logistics areas primarily depends on available statistics and established models.

The impact quantification of the measures focused on the year 2030. With the appropriate level of ambition, there is a realistic prospect of implementing sustainable logistics concepts at least in part by that year. Additionally, this year represents a significant milestone in the national climate protection goals. The expected boundary conditions for 2030 in the trend scenario without additional measures (e.g., traffic volumes or emission factors) form the basis for estimating the specific impacts of the measures as well as for extrapolating their nationwide potential effects in Germany.

Freight transport by road, rail, and inland waterways is accounted for based on the territorial principle. This means that traffic volumes, direct emissions, and energy consumption are considered within Germany's borders. For maritime shipping and aviation, half of the international transport to and from Germany is accounted for to reflect the impact of international economic interconnections on the emission balance. In warehousing, only the operation (TTW and WTT) of warehouses is accounted for. While it would be desirable to also account for the effort involved in establishing the warehouses, this is not feasible within the scope of this project due to the lack of data availability.

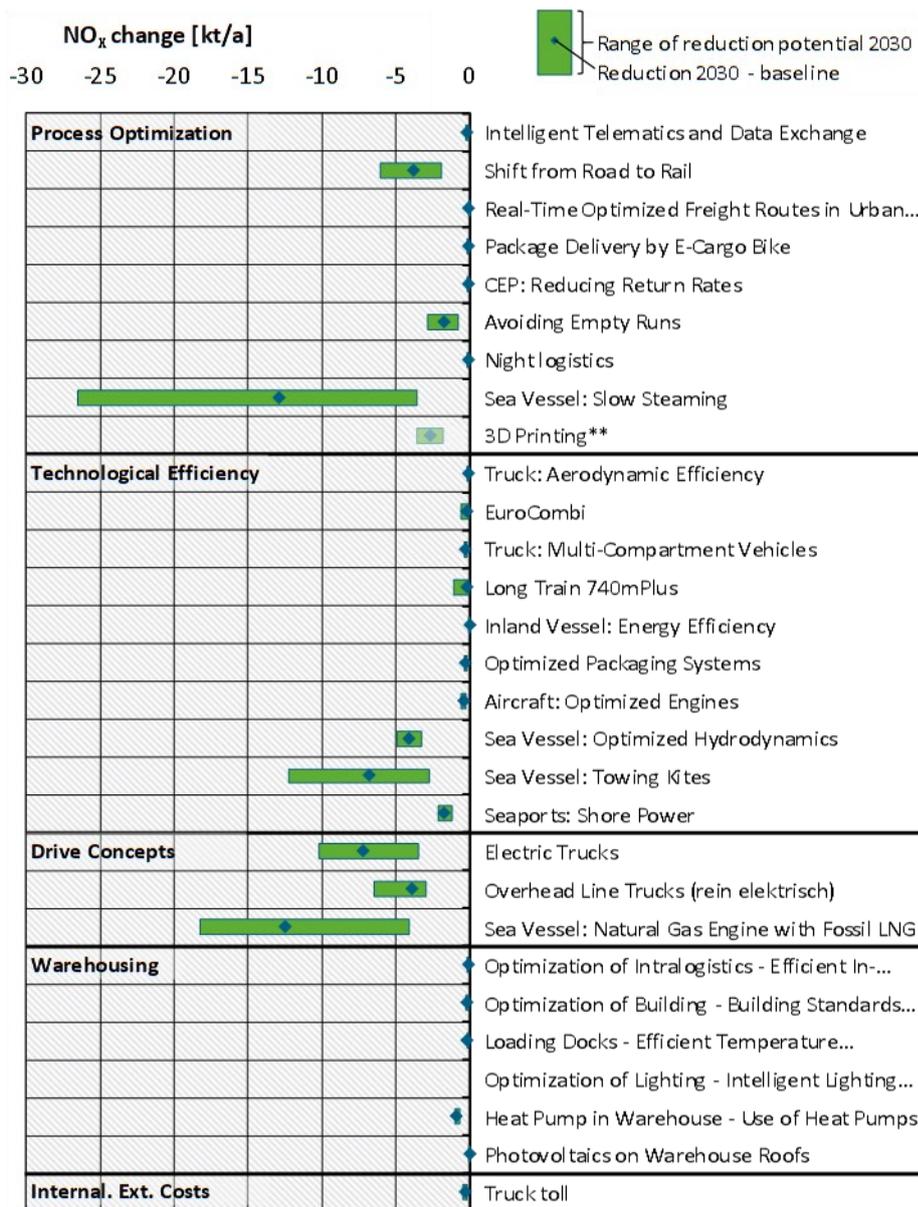
For the impact quantification, it was necessary first to select those measures for which sufficient data is available and whose accounting does not face significant methodological hurdles. This process ultimately resulted in a reduction to 28 measures, categorized by five action areas. The results from the quantification of the measures across all action areas are summarized in Figure 5 (GHG emissions) and Figure 6 (NO_x emissions).

Figure 5: GHG avoidance - overview of all measures (WTW)



Sources: Author's representation (ifeu). Note: *The theoretical maximum potential uses the emission factors and traffic volumes of the year 2030. **For 3D printing, only the possible effects on transport are considered, not the production. The emissions resulting from production could be higher for decentralized printing processes than central production plus delivery.

Figure 6: NO_x avoidance - overview of all measures (TTW)



Sources: Own representation (ifeu). Note: *Theoretical maximum potential uses emission factors and traffic volumes from the year 2030. **For 3D printing, only the potential effects on transportation, not production, are accounted for. The emissions resulting from production could be higher in the case of decentralized printing processes than centralized production plus delivery.

The overall picture is as follows:

- Between the considered measures, there is a wide range of greenhouse gas reduction potentials, varying by several orders of magnitude. This variation is attributed not only to different specific reduction potentials but also to the fact that the potential impact areas of the measures differ significantly. Some measures, for example, have the potential to impact the entire truck fleet in Germany, while others address specific segments within urban logistics.

- ▶ The quantification of GHG reduction potentials for individual measures is fraught with significant uncertainties in many cases. Despite the considerable differences in the calculated impact potentials, robust conclusions can still be drawn from the quantification.
- ▶ By far, the highest GHG reduction potentials in the transport sector result from the potential shift from road to rail (max. 4.4 million tons of CO_{2eq} reduction) and the potential to avoid empty truck trips (max. 2.9 million tons of CO_{2eq} reduction).
 - The shift to rail is primarily limited by infrastructure restrictions but can also benefit significantly from digital innovations. The positive effects of this shift have been known for a long time and extensively discussed in studies. A profound shift towards multimodality in the breadth of freight transport requires a fundamental realignment of German/European transport policy with a prioritized focus on promoting rail freight infrastructure.
 - The percentage of empty trips in freight transport is currently in the European mid-range. The reasons for the high rate of empty trips are multifaceted, including frequent competition-related reluctance to cooperate among various logistics providers, the fragmented structure of the transport sector, and a relatively slow pace of digitization in Germany compared to international standards. Furthermore, technical requirements for transportation, such as specific trailer types, influence flexible deployment. Digitizing processes and enhancing collaboration among logistics providers could, for example, favor the use of freight exchanges to leverage potential for load optimization.
- ▶ In the area of logistics real estate, the largest greenhouse gas reduction potentials by the year 2030 are in the use of heat pumps (max. 2.9 million tons CO_{2eq} reduction) and the installation of photovoltaic systems (max. 3.9 million tons CO_{2eq} reduction) on logistics properties. If these technologies are used extensively in logistics real estate in the long term, they can become energetically positive in the balance. The expansion of photovoltaics also presents strong synergies with the introduction of electric trucks (trucks could be cheaply supplied with renewable electricity, which could significantly accelerate their adoption).
- ▶ The introduction of electric drives (BEV and overhead wire trucks) in the truck sector particularly holds significant long-term climate protection potential. In the medium term, the potential is limited by the slow fleet transition speed and the energy transition in the electricity sector, so that by the year 2030, only about 1.4 million tons CO_{2eq} well-to-wheel (10.5 million tons CO_{2eq} tank-to-wheel) can be saved. Electromobility should not be understood as the sole solution for logistics at least in the medium term.
- ▶ The area of vehicle-side efficiency in road freight transport includes many individual measures, each of which, taken alone, has relatively low GHG reduction potential. The sum of potentials in this area is also significantly behind other areas. This is due, among other things, to the fact that in the recent past, rolling resistances have already been significantly reduced, and thus the potential has already been largely tapped. For efficiency measures in rail vehicles and ships, a significantly higher saving potential could be determined in comparison.
- ▶ However, efficiency measures that reduce operating costs must also take into account the rebound effect: The cost reduction per kilometer leads to an increase in mileage. According to the results, greenhouse gas (GHG) savings from fuel-efficient vehicle technology decrease by 20-40 % when the rebound effect is considered.

- Concepts in the field of city logistics (use of cargo bikes, night logistics) primarily aim at reducing air pollutant emissions and noise in urban areas and have significant potential in this regard. However, they play a subordinate role in reducing GHG.

For the medium-term decarbonization of maritime and air transport, alternative fuels (biogenic and electricity-based) are currently at the center of the discussion. The medium-term availability of such fuels, their future prices, and their life cycle emissions balance are currently highly uncertain and primarily dependent on factors outside the logistics sector (geopolitical developments, regulatory conditions in Germany and Europe). Due to these uncertainties, this project refrained from quantifying emission reduction potentials through the use of renewable fuels.

There is high uncertainty regarding the current prevalence (baseline) of some measures, especially on the vehicle side and the use of digital solutions to reduce vehicle energy consumption, so the calculated potentials in these cases are also subject to additional uncertainty.

The hypothetical combination of all measures (each in the "Max" configuration) results in a greenhouse gas reduction potential of approximately 18.3 million tons of CO_{2eq} in freight transport and 8.9 million tons of CO_{2eq} in logistics properties, totaling 27.2 million tons of CO_{2eq}. This corresponds to a GHG reduction of about 24 % compared to the reference scenario for the year 2030. Direct NO_x emissions could be reduced by up to 81 kt, with the majority of it coming from maritime shipping. The relevant transport modes for air quality in inhabited areas, namely road, rail, and inland waterways, show a maximum reduction of 27 kt NO_x. The aforementioned estimation of the combined effect of all measures is hypothetical and provides an indication of the magnitude of potential reductions if very ambitious measures were implemented very quickly. Even in this case, it would be unlikely to achieve such GHG reductions by 2030 due to the long lead time of many measures. Additionally, assumptions about the individual potentials of measures are subject to high uncertainties. Moreover, developments in the future that cannot be quantified today could occur and change the calculated potentials (e.g., rebound effects). Looking ahead to the years leading up to 2030, ongoing legislative processes could also have significant impacts on the effectiveness or feasibility of individual measures. For instance, the EU Commission's Greening Freight Package could result in relevant shifts in the competitive position of road and rail transport.

The overall estimate presented above considered fundamental interactions between different measures. An example of such an interaction is the use of battery-powered trucks combined with a reduction in truck mileage on the road. For example, the absolute reduction potentials through the avoidance of trips in a diesel-powered truck fleet are higher than in an electrically powered one. The calculated total potential, considering interactions, is thus one-third lower than the sum of individual potentials. Furthermore, in practice, additional interactions are expected that cannot be quantified at the chosen level of analysis.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund & Zielsetzung

Die Studie „Grenzen des Wachstums“ des Club of Rome gab bereits 1972 einen wesentlichen Anstoß zu größerer Umweltsensibilität im Wirtschaftshandeln. Dazu gaben Wetter- und Naturkatastrophen, Smog-Alarme, die Diskussion um Schadstoffemissionen dieselgetriebener Fahrzeuge, Verkehrsstörungen und Staus in Großstädten weiteren Anstoß, Bemühungen in Richtung nachhaltigen Wirtschaftens zu unternehmen und laufend zu verstärken. Zuletzt konnten Demonstrationen verschiedener Bewegungen die Diskussion um Nachhaltigkeit deutlich vorantreiben, und Politik und Wirtschaft greifen Themen und Konzepte der Nachhaltigkeit und des Umweltschutzes verstärkt auf, bspw. mit der Änderung des Klimaschutzgesetzes. Die Notwendigkeit von messbaren Erfolgen nimmt dabei zu, und es stellt sich die Frage, welchen Beitrag verschiedene Branchen, Wirtschaftsbeteiligte, Politik und sonstige Organisationen zur Erreichung von Klimazielen leisten können.

Die Logistik ist ein Wirtschaftsbereich, der allein in Deutschland mit rund 3,3 Mio. Erwerbstätigen ein Umsatzvolumen von rund 285 Mrd. € erwirtschaftet¹. Gemessen am nationalen Bruttoinlandsprodukt stellt die Umsatzgröße der Logistik einen Anteil von rund 8 % dar (2018). Auch innerhalb der Logistik, die für die Beförderung von über 4 Mrd. Tonnen allein in Deutschland verantwortlich ist², stellt sich die Frage, welcher Beitrag zu Umwelt- und Klimaschutz durch die Anwendung neuer Konzepte zur Verkehrsverlagerung, Verkehrsvermeidung, Effizienzsteigerung und durch den Einsatz neuer technologischer Lösungen (darunter insb. alternative Formen des Antriebs wie Elektromobilität) geleistet werden kann.

Nach dem Logistik Performance Index der Weltbank hatte Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten im weltweiten Vergleich der Länder, hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der dort ausgeführten Logistik, immer Spitzenpositionen eingenommen. In jüngster Zeit verschlechterte sich die deutsche Position jedoch durch Kapazitätsengpässe und steigenden Fachkräftebedarf in nahezu allen Verkehrssystemen. Automatisierung und Digitalisierung stellen darüber hinaus größere Herausforderungen an den in weiten Teilen sehr traditionell organisierten Transportsektor. In Summe verlangen diese Trends auch ohne klima- und umweltpolitische Ziele eine Neuausrichtung und Modernisierung des Sektors, welche bis in grundlegende Fragen der Unternehmensorganisation hineinreicht. Zudem sind die technischen und organisatorischen Möglichkeiten zur Emissionsminderung im Güterverkehr nicht endlos. Mit Blick auf diese Herausforderungen an den Logistiksektor liegt der Gedanke einer kombinierten wirtschaftlich-ökologischen Förder- und Anforderungsstrategie an die Güterverkehrsunternehmen nahe. Zentrale Bestandteile hierin könnten der Aufbau von gegenseitigem Prozessverständnis der Logistikpartner und kooperativen Betriebsmodellen für mehr Effizienz entlang der Lieferkette sowie die Förderung technologieoffener und experimentierfreudiger Unternehmenskulturen sein.

Dabei muss im Auge behalten werden, dass ein Umstieg auf nachhaltige Konzepte und Technologien nicht von heute auf morgen zu leisten ist. Auch die Motive von, durch Kennzahlen und Effizienz getriebene, Logistikern stehen einer sofortigen Umsetzung einer großen Bandbreite von Maßnahmen ggf. entgegen.

¹ Vgl. Fraunhofer SCS: Top 100 in European Transport and Logistics Services, Ausgabe 2020/2021. Hamburg: DVV Media Group 2020 (Schwemmer et al., 2020).

² Fraunhofer SCS Erhebung im Rahmen der TOP100 der Logistik Studien, siehe vorherige Fußnote.

1.2 Zielsetzung & Methodischer Rahmen des Projekts

Ziel des Projektes ist es, bestehende Maßnahmen zu identifizieren und Konzepte abzuleiten, welche bereits eine positive Umweltwirkung ausweisen können oder durch gezielte Anpassung Potenziale dafür haben.

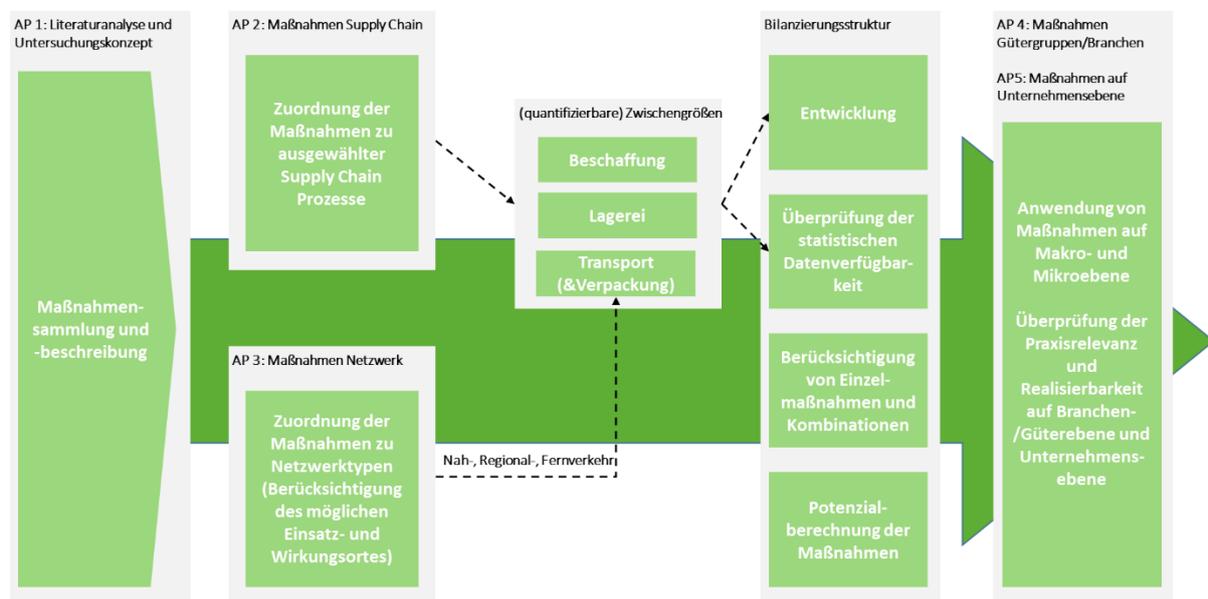
Die ganzheitliche Betrachtung im Projekt schließt die Zusammenführung von Erkenntnissen aus Theorie und Praxis ein und stützt sich auf Ergebnisse aus quantitativen und qualitativen Methoden und Auswertungen. Sowohl nationale als auch internationale Erfahrungswerte und Modelle werden in die Betrachtungen einbezogen.

Die Analyse von Faktoren und deren Wirkungsgraden erfolgt mittels Betrachtung wesentlicher generischer Bestandteile der Logistik (Supply Chain und Netzwerk). Die Anwendbarkeit der abgeleiteten Maßnahmen wird auf Makro- (Gütergruppen- bzw. Branchenebene) sowie Mikroebene (Unternehmensebene) betrachtet. Es wird analysiert, welche Möglichkeiten für eine erfolgreiche Implementierung in der Praxis bestehen und wie Maßnahmen ggf. ausgestaltet werden müssen, um sowohl einen möglichst großen Einfluss auf Natur, Klima und Umwelt als auch eine hohe Akzeptanz bei Unternehmer*innen und Unternehmen zu erzielen.

Zudem sollen die Ergebnisse wichtige Erkenntnisse für eine zukünftige Entwicklung erfolgreicher Förder- und Unterstützungsmaßnahmen zur Stärkung nachhaltiger Logistik in der Praxis darbieten.

Abbildung 7 gibt einen schematischen Überblick über den Projektverlauf. In den folgenden Kapiteln werden die verwendeten Methoden und zugrundeliegenden Maßnahmen detailliert ausgeführt.

Abbildung 7: Schematische Darstellung der Projektübersicht (AP1-5)



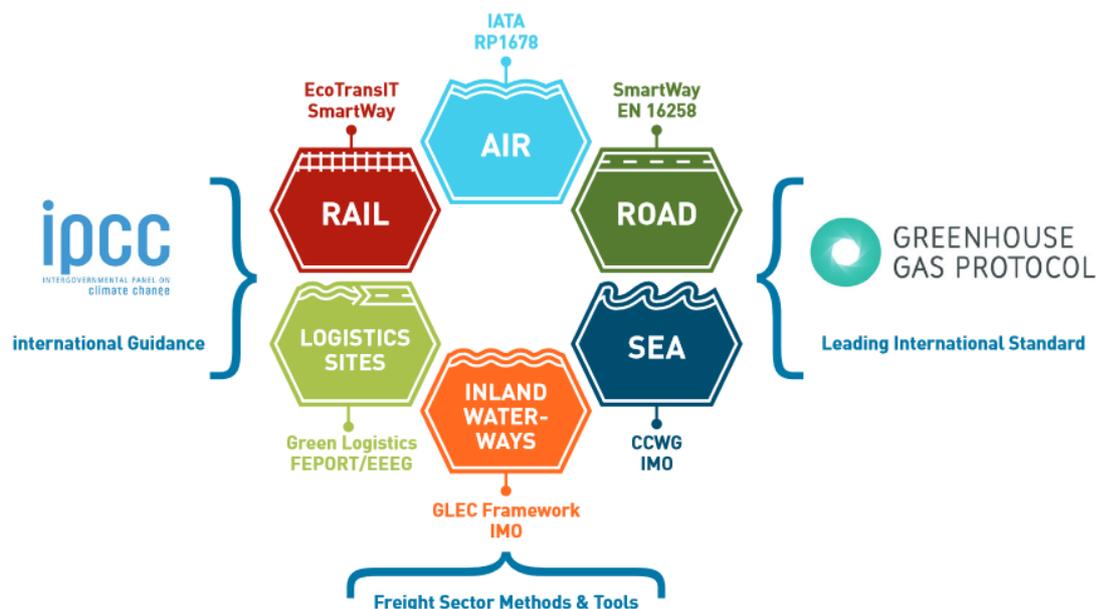
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IIS

1.3 Existierende Methoden zur Emissionsbilanzierung in der Logistik

Es existieren verschiedene Methoden zur Bilanzierung von Emissionen, aus denen sich in weiterführender Analyse Emissionsminderungspotenziale ermitteln lassen. Mit Fokus auf die Logistik ist die DIN EN 16258 zu nennen, die eine einheitliche Methode zur Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen vorgibt³. Die Norm wurde das letzte Mal 2013 aktualisiert und wird derzeit in einem ISO-Normungsprozess überarbeitet (aktueller Stand: Vorbereitung). Der aktuelle Stand der EN 16258 berücksichtigt nur die Transporte selbst und keine stationären Einrichtungen für Umschlag und Lagerung. Die Kraftstoffvorketten sind berücksichtigt, wozu die Norm auch Angaben zu Umrechnungs- und Emissionsfaktoren macht. Herstellung, Unterhalt und Entsorgung der Fahrzeuge bleiben genauso wie die Verkehrsinfrastruktur unberücksichtigt.

Etwas umfassender und einheitlicher berücksichtigt das GLEC⁴ Framework die Emissionen aus Logistikketten. Es wurde 2014 aufgrund des noch nicht zufriedenstellenden Bilanzierungsrahmens der EN 16258 und der unzureichenden Vergleichbarkeit der Bilanzen zwischen Unternehmen ins Leben gerufen. Es handelt sich um eine Methode zur Berichterstattung über CO₂-Emissionen, die alle Verkehrsträgermittel und Umschlagplätze des globalen Logistikangebots umfasst. Dabei werden relevante Emissionsberechnungsstandards und Methoden für Logistikunternehmen integriert⁵ (siehe Abbildung 3). Im Jahr 2016 wurde eine Aktualisierung des GLEC-Frameworks veröffentlicht und bildet nun einen Leitfaden für Verlager, Spediteure und Logistikdienstleister zur Berichterstattung über Emissionen aus Logistikoperationen. Der aktuelle ISO-Normungsprozess orientiert sich sehr stark an den Vorgaben der GLEC.

Abbildung 8: Integration von existierenden Standards und Methoden im GLEC-Framework



Quelle: Smart Freight Centre

³ DIN EN 16258 - Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)

⁴ Der Global Logistics Emissions Council (GLEC), geleitet vom Smart Freight Centre, ist eine internationale Gruppe von Unternehmen, Verbänden und Programmen, die von Fachexperten unterstützt wird.

⁵ DIN EN 16258, Clean Cargo Working Group, IATA RP 1678 and SmartWay, EU funded project COFRET, US National Cooperative Freight Research Program

Sowohl der Norm als auch dem Framework ist gemein, dass sie sich auf einzelne Logistikketten von Unternehmen fokussieren und keine kompletten Branchen in den Blick nehmen, zum anderen bei internationalen Transporten keine Aufteilung auf einzelne Länder vornehmen. So ist zumindest eine branchenspezifische Betrachtung limitiert und die Bewertung von Emissionsminderungspotenzialen von unternehmensübergreifenden Logistikkonzepten und allgemeinen Trends kann nicht hinreichend abgebildet werden.

Das Emissionsberechnungsmodell „TREMODO“ (Transport Emission Model) bildet u. a. den Güterverkehr in Deutschland ab. Somit kann der Güterverkehr insgesamt nach Verkehrs- und Fahrleistungen, Energieverbräuche und den zugehörigen Klimagas- und Luftschadstoffemissionen bilanziert werden. Nicht abgebildet sind hier hingegen die transportierten Güter, die zum Einsatz kommenden Logistikfunktionen und Netzwerktypen sowie die wirtschaftliche Struktur der Logistikbranche. Somit fehlen in TREMOD wichtige Grundlagen, um die Logistikbranche differenzierter zu betrachten und Maßnahmenwirkungen abzubilden. Daher sind Anpassungen bzw. Spezifikationen an den Verkehrsdaten vorzunehmen. Für diese Verfeinerung der Daten werden Erkenntnisse und Analysen aus dem UBA-Projekt „TraViMo“ (Transportstrom-Visualisierungs-Modell) verwendet, um so eine detaillierte Betrachtung durchzuführen.

Die Betrachtung weiterer Analyseebenen – wie der Supply Chain, Logistiknetzwerken, Gütergruppen und Unternehmen - sind jedoch zentraler Forschungsgegenstand des Projektes. Somit war eine Neuentwicklung der Bilanzierungsstruktur nötig, die an die bestehenden Bilanzierungsmodelle im Logistikbereich (bottom-up) und das nationale Emissionsberechnungsmodell TREMOD (top-down) anknüpft.

2 Trends und Rolle der Nachhaltigkeit in der Logistik

2.1 Trends in der Logistikbranche und mögliche Effekten auf die Emissionen

Ausgehend von den 10 Megatrends der Logistik gemäß Fraunhofer SCS wurde eine Trendanalyse hinsichtlich potenzieller positiver und negativer Wirkungen auf Umwelt und Nachhaltigkeitsziele durchgeführt. Weitere Trends wurden mittels strukturierter Desk Research aktualisiert, sodass insgesamt 11 Megatrends, 8 Nebentrends sowie 2 regionale Trends erfasst wurden, welche nachfolgend gelistet sind. Im Unterschied zu Nebentrends und regionalen Trends, geht man bei Megatrends davon aus, dass diese deutlich länger andauern werden und Auswirkungen auf mehrere Lebensbereiche haben. Sie sind global relevant, wenn auch in regional unterschiedlich starker Ausprägung. Trends (hier Nebentrends genannt) wirken im Vergleich dazu auf nur einen Lebensbereich, bzw. auf einen spezifischen Markt und klingen in der Regel schneller ab als Megatrends. Zudem wurden in diesem Projekt regionale Trends ergänzt, die stark abhängig von regionalen Gegebenheiten und Regulierungen sind. Erkenntnisse daraus fließen in eine spätere Hochrechnung der Potenziale von Maßnahmen ein.

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht zu relevanten Megatrends mit Bezug zur Logistik, sowie eine Abschätzung der Trendwirkung auf die Logistik:

Tabelle 3: Übersicht relevanter Megatrends und deren möglichen Effekte auf Emissionen

Megatrends
<p>Demografischer Wandel (vgl. (Schwemmer, 2019); (Klumpp, 2014); (<i>Transport & Logistik Kompass</i>, 2016))</p> <p><u>Trendbeschreibung:</u> Der demografische Wandel wirkt sich einerseits auf die Arbeitnehmer*innen aus, die momentan in der Logistikbranche beschäftigt sind. Dieser zieht einen Generationenwechsel und insbesondere einen Fachkräftebedarf mit sich. Zudem wirkt sich das Erwerbspersonenpotenzial stark auf ökonomische Kenngrößen aus und kann die Verkehrsmengen im Güterverkehr als abgeleitete Größe wirtschaftlicher Aktivitäten erhöhen. Gleichzeitig wirkt sich der demografische Wandel allgemein auf die Nachfrage der Verbraucher aus, was sich in der Logistikbranche niederschlägt. Abhängig demographischer Gegebenheiten kann es dadurch zu einem Absinken der Transportnachfrage und damit verbundenen positiven Umweltwirkungen kommen. Demgegenüber steht ein Trend zur Urbanisierung, der zu einem Anstieg des Transportaufkommens in bereits dicht besiedelten Gebieten führen kann.</p> <p><u>Wirkungsbeschreibung:</u> regionaler Bezug / neutrale Umweltwirkung</p>
<p>Externe Risiken und Unterbrechungen (vgl. (Kersten et al., 2016); (Kersten et al., 2017); (Schwemmer, 2019))</p> <p><u>Trendbeschreibung:</u> Risiken können die Logistik und das Supply Chain Management auf vielfältige Weise beeinträchtigen. Neben einer erhöhten Volatilität aufgrund von Veränderungen in der Weltwirtschaft sowie politischen Entwicklungen (z. B. Handelskonflikte/-barrieren, Protektionismus) sind auch Naturkatastrophen oder die kontinuierlich wachsende Bedrohung durch Cyberangriffe ernstzunehmende Risiken für die Wertschöpfungskette. Störungen in einem Abschnitt können die gesamte Kette lahmlegen, weshalb sie frühzeitig erkannt und adressiert werden sollten.</p> <p><u>Wirkungsbeschreibung:</u> globaler Bezug / neutrale Umweltwirkung</p>
<p>Fachkräftebedarf (vgl. (Schwemmer, 2019); (Schwemmer & Hempfing, 2019); (Kersten et al., 2016))</p> <p><u>Trendbeschreibung:</u> In den letzten Jahren zeigt sich ein ausgeprägter Engpass an Fachkräften in vielen Branchen, der sich in Zukunft noch weiter verstärken wird. Dies lässt sich zum einen auf ein geringes Angebot an Arbeitskräften bei gleichzeitig hoher Nachfrage, aber auch auf strukturelle Entwicklungen wie den demografischen Wandel und den damit einhergehenden Generationenwechsel zurückführen.</p>

Megatrends

Wirkungsbeschreibung: globaler Bezug / neutrale Umweltwirkung

Globalisierung (vgl. (Altmann & Bastian, 2019); (Schwemmer, 2019); (Kille & Meißner, 2020))

Trendbeschreibung: Die Globalisierung setzt umfassend in nahezu allen Bereichen innerhalb der Logistikbranche an und beeinflusst ebenso die globale Nachfrage nach Logistiklösungen. Hierbei werden sämtliche Stufen der Lieferketten berührt, was zu Verlagerungsprozessen und einem deutlich erhöhten weltweiten Transportgeschehen führt.

Wirkungsbeschreibung: globaler Bezug / negative Umweltwirkung

Der Globalisierungsprozess führt zu einer Entkoppelung von Produktion oder Dienstleistung und räumlichem Bezug. Somit werden immer größere Strecken zurückgelegt, die sich zwar finanziell lohnen, jedoch massive Auswirkungen auf die Umwelt haben.

Individualisierung (vgl. (Rodenhäuser & Rauch, 2015); (Kersten et al., 2016); (Kersten et al., 2017))

Trendbeschreibung: Individuelle Kundenwünsche resultieren in einer großen Vielfalt an Gütern und einer Diversifizierung der Logistikdienstleistungen. Ein umfangreiches Sortiment am Verkaufsort geht dann häufig mit der Anforderung nach geringen Liefermengen und kurzen Lieferzeiten einher. Die Unternehmen müssen daher die Herausforderung meistern, ihre bestehenden Produktions- und Logistiksysteme durch flexiblere Strukturen und Auslieferkonzepte auf kleine Losgrößen anzupassen.

Wirkungsbeschreibung: regionaler Bezug / negative Umweltwirkung

Aus diesem Trend resultieren immer kleinere Liefermengen bei kürzeren Lieferzeiten. Dies kann u. a. zu geringeren Transportauslastungen und somit erhöhten THG-Emissionen führen.

Wettbewerbsdruck (vgl. (Kersten et al., 2016); (Kersten et al., 2017); (Continental Mobilitätsstudie 2016 - Der vernetzte Truck, 2016))

Trendbeschreibung: Der Kostendruck beeinflusst maßgeblich die Logistik und das Supply Chain Management. Eine höhere Preistransparenz und -sensibilität der Kunden sowie ein wachsender internationaler Wettbewerb, gepaart mit immer weiter steigenden Logistikkosten, stellen die Unternehmen vor die Aufgabe, Aufträge so kosteneffizient wie möglich abzuwickeln und zugleich alle möglichen Einsparpotenziale auszunutzen.

Wirkungsbeschreibung: globaler Bezug / negative Umweltwirkung

Durch den steigenden Kostendruck werden die Gewinnmargen in der Logistikbranche zunehmend kleiner. Somit sind die finanziellen Spielräume zur Durchsetzung umweltschonender Maßnahmen deutlich geringer.

Nachhaltigkeit (vgl. (Zanker, 2018); (Kersten et al., 2017); (Swarz et al., 2018); (Schwemmer, 2019))

Trendbeschreibung: Einzelne Unternehmen und gesamte Wertschöpfungsketten müssen neben wirtschaftlichen Aspekten auch verstärkt die ökologischen und sozialen Auswirkungen ihres Handelns in den Vordergrund rücken und dies auch transparent gegenüber ihren Stakeholdern kommunizieren. Elektrische Antriebe und das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz sind nur zwei Beispiele für wichtige Schritte in Richtung einer ökologisch und sozial nachhaltigeren Zukunft.

Wirkungsbeschreibung: globaler Bezug / positive Umweltwirkung

Durch ein generell gesteigertes Bewusstsein für Nachhaltigkeit können mehr Maßnahmen für eine Minderung von THG-Emissionen oder andere umweltfreundliche Projekte durchgesetzt werden.

Neue Akteure und Wettbewerber (vgl. (Schwemmer, 2019))

Trendbeschreibung: Mehr und mehr neue Akteure und Wettbewerber drängen in den Markt und stellen so eine neue Konkurrenz für bestehende Strukturen dar. Das Eindringen von neuen Akteuren führt nicht nur zu einem steigenden Kostendruck, sondern auch zu wachsenden Wahlmöglichkeiten. So können Kunden durch ihre Entscheidungen für Wettbewerber gewisse Ansichten und Wertvorstellungen durchsetzen

Megatrends

Wirkungsbeschreibung: globaler Bezug / neutrale Umweltwirkung

Zum einen können Akteure, die nachhaltige Alternativen anbieten, leichter in den Markt dringen und so zu positiven Umweltauswirkungen führen. Auf der anderen Seite können Akteure auf den Markt drängen, die auf Kosten von negativen Umweltbelastungen billigere Leistungen anbieten können.

Servitization (vgl. (Schwemmer, 2019); (Raddats et al., 2019); (Nebuloni et al., 2019))

Trendbeschreibung: Im Zuge der Servitization verlagern sich die Anteile der Wertschöpfung immer weiter in einen immateriellen Bereich hinein. Es handelt sich um einen Übergang von einer industriellen zu einer Serviceökonomie, in der als zusätzliche Produkte nachgelagerte Dienstleistungen angeboten werden, die zu einer engeren Vernetzung im B2B- und B2C-Bereich führen.

Wirkungsbeschreibung: globaler Bezug / positive Umweltwirkung

Technologischer Wandel und Digitalisierung (vgl. (Kagermann et al., 2013); (Manyika et al., 2017); (bitkom, 2019))

Trendbeschreibung: Besonders durch verstärkte Automatisierungsprozesse werden sich bestehende Prozesse in der Logistik und in vor- oder nachgelagerten Branchen nachhaltig verändern und zunehmend effizienter gestaltet werden. Hierbei wird auch die zunehmende Digitalisierung aller Bereiche eine große Rolle spielen. Diese Trends sind so umfassend, dass sie sowohl direkt aber auch indirekt großen Einfluss auf die Logistikbranche ausüben.

Wirkungsbeschreibung: globaler Bezug / Umweltwirkung vielseitig

Die Automatisierungs- und Digitalisierungsprozesse haben große Auswirkungen auf die Effizienz in den verschiedenen Branchen und können sich somit positiv auf die Umwelt auswirken. Gleichzeitig führt diese Effizienzsteigerung und Zunahme an Optionen zu einer Zunahme der Produktion und des Verbrauchs und somit auch zu einem erhöhten Energieverbrauch.

Verändertes Kaufverhalten/ neue Lebensstile (vgl. (Kersten et al., 2017); (Schwemmer, 2019))

Trendbeschreibung: Die Entwicklung der Vertriebswege hin zu digitalen Plattformen führt zu differenzierteren und stärker individualisierten Logistikdienstleistungen. Zugleich ist ein weiterer Wandel im Einzelhandel von Einzelkanalvertrieb hin zu Multikanal- und Omnikanalvertrieb zu beobachten, bei gleichzeitigem Rückgang des stationären Einzelhandels. Zudem hat sich das gewünschte Produktspektrum im Vergleich zu früheren Käufergenerationen verändert.

Wirkungsbeschreibung: globaler Bezug / negative Umweltwirkung

Logistikanbieter müssen sich auf das veränderte Käuferverhalten einstellen und konkurrieren mit ihren Marktbegleitern noch stärker im Bereich der Bequemlichkeit und Kundenorientierung.

Tabelle 4 zeigt nun im Gegensatz eine Übersicht zu relevanten Nebentrends, die speziell auf die Branche Logistik wirken:

Tabelle 4: Übersicht relevanter Nebentrends und deren möglichen Effekte auf Emissionen

Nebentrends

Alternative Antriebsformen (vgl. (Rüdiger, 2014); (von Storch, 2019); (bitkom, 2019)BITKOM, 2019)

Trendbeschreibung: Das Klimaschutzgesetz und das Übereinkommen von Paris, in Verbindung mit einem erhöhten Umweltbewusstsein, lässt alternative Antriebsformen zu den herkömmlichen Dieselfahrzeugen mehr in den Fokus der Logistiker rücken. Diese werden vorerst in Pilotprojekten erprobt und sollen dann zu einer Marktreife gebracht werden.

Nebentrends

Wirkungsbeschreibung: globaler Bezug, spezifischer Markt / positive Umweltwirkung

Der Übergang von fossilen Brennstoffen hin zu alternativen Antriebsformen hat große Auswirkungen auf die Emissionen von THG und kann so nachhaltig positive Umweltwirkungen erzielen.

Anticipatory Logistics durch Big Data (vgl. (Zapfl, 2019))

Trendbeschreibung: Durch die Auswertung von Big Data kann das Eintreffen von Ereignissen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorausgesagt werden. So kann bspw. das Kundenverhalten der Vergangenheit analysiert werden und somit Waren an Auslieferungslager geliefert werden, die die Kunden noch gar nicht bestellt haben.

Wirkungsbeschreibung: globaler Bezug, spezifischer Markt / positive Umweltwirkung

Autonome Last Mile Delivery / Intralogistik (vgl. (Schröder et al., 2018); (joerss et al., 2016); (bitkom, 2019))

Trendbeschreibung: Für eine Kosten- und Zeitersparnis können unbemannte E-Fahrzeuge oder Drohnen zum Einsatz kommen, die eine Zustellung durch einen Mitarbeiter ersetzen. Voraussetzung dafür sind geeignete rechtliche Rahmenbedingungen, die derzeit ungeklärt sind. Vor allem in der Intralogistik können autonome Fahrzeuge deutliche Effizienzsteigerungen erzielen.

Wirkungsbeschreibung: globaler Bezug, spezifischer Markt / positive Umweltwirkung

Autonome Liefersysteme können große Effizienzsteigerungen erreicht werden, die schlussendlich auch zu verminderten THG-Emissionen und so zu positiven Umwelteffekten führen können

Komplexität (vgl. (Kersten et al., 2016); (Kersten et al., 2017); (Kohl & Pfretzschner, 2018))

Trendbeschreibung: Komplexität entsteht durch die wachsende Anzahl an Produkten, Teilen, Zulieferern, Dienstleistungen usw., die koordiniert werden müssen, sowie durch deren Veränderungen im Laufe der Zeit. Dieser Zusammenhang ist häufig nicht linear, sondern wächst überproportional mit der Anzahl der beteiligten Elemente. Die Digitalisierung kann dabei helfen, die Komplexität wieder handhabbar zu machen, sorgt aber zugleich seinerseits für neue zu bewältigende Komplexität.

Wirkungsbeschreibung: globaler Bezug / negative Umweltwirkung

Durch eine steigende Komplexität in der Logistikbranche lassen sich Bestellungen, Transporte oder Aufträge schwerer koordinieren und bündeln. Dies kann zu einer geringeren Auslastung und somit verringerter Effektivität führen.

Nachfüllstationen im Einzelhandel (vgl. (Luttenberger & Punschard, 2020))

Trendbeschreibung: Gerade um einem steigenden Umweltbewusstsein gerecht zu werden und den Verpackungsmüll deutlich zu reduzieren, werden mehr und mehr Nachfüllstationen im Handel angeboten. So können eigene Verpackungen wieder aufgefüllt werden und es wird kein zusätzliches Verpackungsmaterial benötigt. Ebenso wirkt sich dies auf Größe und Beschaffenheit von Transportbehältern aus, da deutlich größere Gebinde transportiert werden.

Wirkungsbeschreibung: spezifischer Markt / positive Umweltwirkung

Zum einen werden die Verpackungen direkt im Einzelhandel reduziert, zum anderen kann die Größe der Gebinde in der Logistik entsprechend angepasst werden und somit weitere positive Effekte auf die Umwelt erzielt werden.

Recycling-Innovationen (vgl. (Luttenberger & Punschard, 2020); (Bovensiepen et al., 2018))

Trendbeschreibung: Gerade durch anhaltende Nachhaltigkeitsdebatten werden Verpackungsinnovationen entwickelt und vermarktet, wenngleich die Kapazitäten für deren Wiederverwertung unter Umständen noch nicht vorhanden sind. Dabei stehen besonders rezyklierbare Materialien oder Pfandsysteme im Vordergrund.

Nebentrends

Wirkungsbeschreibung: globaler Bezug / positive Umweltwirkung

Durch Recycling-Innovationen oder Pfandsysteme in der Verpackungsbranchen können Ressourcen eingespart bzw. dem Kreislauf wieder zugeführt werden.

Frachtraumoptimierung durch Logistikbörsen und Frachtmakler (vgl. (Zapfl, 2019))

Trendbeschreibung: Das Vermitteln von freiem Frachtraum über Logistikbörsen und Frachtmakler ermöglicht sowohl das Zusammenlegen von Sendungen verschiedener Verloader, und somit das Erreichen einer höheren Transportauslastung, als auch eine Reduzierung von Leerfahrten Diese gesteigerte Effizienz führt dabei zu positiven Umwelteffekten und sinkenden Kosten.

Wirkungsbeschreibung: globaler Bezug / positive Umweltwirkung

Die erhöhte Effizienz und die Reduzierung von Leerfahrten ziehen deutliche positive Effekte für die Umwelt mit sich.

Umstrukturierung der Lieferketten durch 3D-Druck (vgl. (Zapfl, 2019); AEB, 2016)

Trendbeschreibung: Durch die Möglichkeit Teile per 3D-Druck zu produzieren erhöht sich die Geschwindigkeit der Lieferkette deutlich. Durch dezentrale Produktionen können individualisierte Gegenstände in der Nähe oder direkt beim Verbraucher produziert werden.

Wirkungsbeschreibung: spezifischer Markt / Umweltwirkung vielseitig

Tabelle 5 zeigt abschließend eine Übersicht zu relevanten regionalen Trends im Kontext Logistik:

Tabelle 5: Übersicht relevanter regionaler Trends und deren möglichen Effekte auf Emissionen

Regionale Trends

Staatliche Regulierungen / Compliance (vgl. (Kersten et al., 2016); (Kersten et al., 2017))

Trendbeschreibung: Staatliche und supranationale Regulierungen legen den Handlungsrahmen für das Supply Chain Management fest. Die Entwicklungen in diesem Bereich werden stark von politischen Erwägungen und Entscheidungen beeinflusst. Unternehmen sind in der Folge verpflichtet, Gesetze, Richtlinien, Mautregelungen, Zölle usw. einzuhalten.

Wirkungsbeschreibung: regionaler Bezug / positive Umweltwirkung

Durch stärkere staatliche Regulierungen, die sich besonders in letzter Zeit im Bereich von Umweltauflagen bewegen, können positive Auswirkungen auf die Umwelt oder auch auf die Nachfrage entstehen.

Steigerung der Zustellquote durch neue Ansätze (vgl. (Zapfl, 2019))

Trendbeschreibung: Durch einen erfolglosen ersten Zustellversuch entsteht eine Unzufriedenheit bei den Kunden und ein deutlicher Mehraufwand beim Logistiker. Mithilfe verschiedener Ansätze, bspw. eine Zustellung im Kofferraum des Kunden oder durch unabhängige oder proprietäre Paketboxen, kann diesem Problem in Zukunft begegnet werden.

Wirkungsbeschreibung: regionaler Bezug / positive Umweltwirkung

Durch Steigerung der Erstzustellungsquote wird der Aufwand für die Logistiker erheblich reduziert. Die Reduktion von Zusatzfahrten und eine Steigerung der Effizienz können negative Umwelteinflüsse verringern.

2.2 Nachtlogistik

Kommunale Restriktionen, bspw. zur Lärmvermeidung, bewirken eine Begrenzung von Lieferzeitfenstern. Infolgedessen entfallen viele Zustell Touren unterschiedlicher Unternehmen zur Warenversorgung auf ähnliche bzw. gleiche Zeitfenster, wodurch der Verkehrsträger Straße in diesen Zeiträumen überproportional belastet wird. Eine Möglichkeit, die verkehrlichen Auswirkungen abzuschwächen, stellt die Verlagerung von Transporten in Tagesrandzeiten und die Nacht dar (auch als „Off-Peak Delivery“ bekannt).

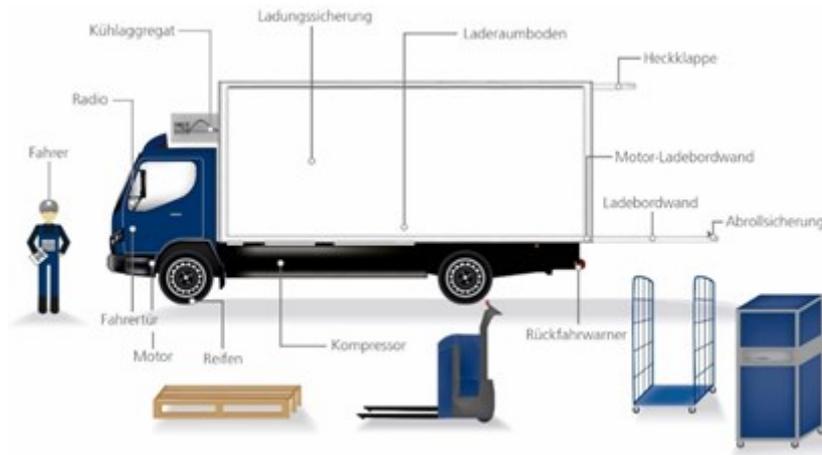
Die Grundidee dieses Logistikkonzeptes der „geräuscharmen Nachtlogistik“ ist es, freie Räume und freie Zeiten in Tagesrandzeiten vor 6 Uhr und nach 22 Uhr, zur Versorgung mit batterieelektrisch-betriebenen Lkw (E-Lkw) zu nutzen. So ist die Verkehrsinfrastruktur tagsüber weniger belastet und durch die Verlagerung eines Teils der Lieferverkehre in die Nacht und Tagesrandzeiten kann die Logistik effizienter abgewickelt werden. Unterstützt durch den Einsatz von E-Lkw und geräuscharmen Umschlags- und Ladehilfsmitteln hat dieses Konzept das Ziel, die städtischen Lieferverkehre zeitlich zu entzerren, Ressourcen effizienter zu nutzen und die Lärm- und Schadstoffbelastung in den Städten zu reduzieren. Da die Touren bei gleicher Strecke in kürzerer Zeit abgewickelt werden können, werden in Summe weniger Fahrzeuge und Fahrer benötigt und die Verkehrsbelastung in den Städten reduziert. Die leiseren und umweltfreundlicheren Fahrzeuge werden von den Logistikdienstleistern auch für die normalen Zustell Touren im Stadtgebiet eingesetzt werden. So profitieren die Bürger von dem geräuscharmen Logistikkonzept auch am Tage. Die Nachtruhe ist ein hohes und gesetzlich geschütztes Gut. In dem vom Fraunhofer IML geleiteten Forschungsprojekt „Geräuscharme Nachtlogistik“ (GeNaLog) wurde nachgewiesen, dass es technisch möglich ist, die ausschlaggebenden Immissionsrichtwerte der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) am Beispiel von drei Supermarktstandorten in Köln einzuhalten. Hierzu war u. a. der Einsatz von einem batterieelektrisch betriebenen Lkw (18t zGg.) und leisem Umschlagsequipment in Verbindung mit weiteren organisatorischen Maßnahmen wie Fahrerschulungen und Anwohnerinformationen zwingend notwendig.

Angesichts der im Jahr 2019 auf europäischer Ebene verabschiedeten europäischen Regulierung bei Nutzfahrzeugen ist für die kommenden Jahre auszugehen, dass ein Hemmnis bei der Umsetzung der geräuscharmen Nachtlogistik – die Verfügbarkeit von entsprechenden Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben – in den kommenden Jahren abnehmen wird. Es ist davon auszugehen, dass mehr und mehr Lkw mit alternativen Antrieben wie Elektro-, Hybrid, Gasantrieb oder langfristig auch Wasserstoff als Ersatz für dieselmotorenbetriebene Fahrzeuge und das technische Logistikequipment eingesetzt werden können und damit das Konzept der geräuscharmen Nachtlogistik aus technischer Perspektive besser realisierbar ist.

Der geräuscharme Betrieb ist ein Alleinstellungsmerkmal von E-Lkw. E-Lkw sind daher momentan Grundlage der „geräuscharmen Logistik“. Generell ist der Ansatz des vorliegenden Projektes aber technikneutral. Lkw mit Dieselmotoren hingegen sind für eine geräuscharme Anlieferung entsprechend den Immissionsrichtwerten der TA Lärm i. d. R. zu laut. Diese dient dem Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Lärm. So dürfen bspw. in einem Kern-, Dorf- und Mischgebiet tagsüber maximal 60 dB(A) und nachts 45 dB(A) emittiert werden, während in einem reinen Wohngebiet die Richtwerte tagsüber bei 50 dB(A) und nachts bei 35 dB(A) liegen. Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen dürfen diese Richtwerte in der Nacht um nicht mehr als 20 dB(A) überschreiten. Aber nicht nur die Motorengeräusche sind zu beachten, sondern auch die einzelnen technisch-organisatorischen Komponenten der Logistik. So sind vollelektrische leise Kühlaggregate und Ladebordwände bereits am Markt erhältlich.

Bei den logistischen Abläufen entstehen eine Vielzahl an Geräuschemissionen z. B. durch das Öffnen und Schließen der Fahrertür oder dem Überfahren der Ladebordwand mit Ladehilfsmittel. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick der relevanten Geräuschquellen.

Abbildung 9: Identifizierte Geräuschquellen beim Anlieferprozess an der Filiale



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IML

Das Konzept der geräuscharmen Nachtlogistik ist besonders für das Segment Handel von Relevanz. Hier existieren neben den Erfahrungen aus dem GeNaLog-Projekt auch Erkenntnisse im Bereich der Handelsbelieferung aus bspw. Stockholm (Schweden), Barcelona (Spanien) und mehreren Städten der Niederlande. In den Niederlanden hat sich seit 2004 das Piek-Zertifikat etabliert, ein Zertifizierungssystem für geräuscharme Produkte und Fahrzeuge, das eine nächtliche Einfahrt in Städte erlaubt.

Bedingt ist dies zum einen dadurch, dass Handelsfilialen zu großen Teilen mit schweren Lkw beliefert werden, woraus verkehrliche Herausforderungen aber auch erhöhte Lärmbelastungen resultieren und zum anderen dadurch, dass diese Filialen meist mit dem eigenen Fuhrpark oder festen Logistikdienstleistern beliefert werden. Dies erleichtert die notwendige Umstellung der internen Distributionsprozesse. Zusätzlich ist eine Übertragung dieses Konzepts auf weitere Gütersegmente wie bspw. Post, Pakete und Stückgut denkbar, wenn eine Möglichkeit zur Annahme der Güter während der Tagesrandzeiten oder der Nacht geschaffen werden kann. Zukünftig dürfte die Relevanz daher in diesem Segment zunehmen, da mit vermehrtem Einsatz von Mikrodepots und Warenübergabesystemen die logistischen Prozesse einfacher verlagert werden können und die Anwesenheit des Empfängers zur Warenannahme nicht unbedingt erforderlich ist.

Als potenzielle Zustellgebiete innerhalb einer Stadt sind entsprechend des Flächennutzungsplans vor allem Gewerbegebiete, allgemeine Wohngebiete und Wohn-, Dorf- und Mischgebiete interessant. Zusätzlich können Gebiete in Betracht gezogen werden, die nur einen geringen Anteil an reinen Wohngebieten enthalten, da innerhalb von Wohngebieten die maximal erlaubten Lärmrichtwerte nicht eingehalten werden können. Reine Industriegebiete können aus Sicht der TA Lärm hingegen auch bereits heute während der Tagesrandzeiten beliefert werden, da hier der Lärmrichtwert recht hoch ist.

Für die Bilanzierung (siehe Kapitel 4 und 5) werden daher alle zur Handelsversorgung eingesetzten Fahrzeuge (SNF) betrachtet, da dies den Projekterfahrungen, den Fahrzeugen für

die Belieferung des Einzelhandels entspricht. Die Distanz zwischen Quelle und Ziel wird aufgrund der zu erwartenden technologischen Entwicklung der Batterien auf 100 km beschränkt, wodurch Tourlängen von bis zu 200 km realisiert werden können.

2.3 Stellenwert der Nachhaltigkeit in der deutschen Logistikbranche

Im Rahmen des Projektes steht die Frage im Fokus, welchen Beitrag die Anwendung von Konzepten der nachhaltigen Logistik zum Umwelt- und Klimaschutz leisten kann. Die Akzeptanz der Konzepte bei beteiligten Akteuren*innen und praxistaugliche Ausgestaltungsmöglichkeiten sind dabei essenziell für eine erfolgreiche Implementierung und Voraussetzungen für das Design wirkungsvoller Fördermaßnahmen. Daher wurde projektbegleitend eine Online-Umfrage durchgeführt, in welcher folgende Themenkomplexe abgefragt wurden:

- 1) Einschätzung des Status quo zu Nachhaltigkeit in der Logistik
- 2) Einschätzung der Relevanz von verschiedenen Maßnahmenbereichen
- 3) Auswirkungen von Maßnahmenbereichen auf die Unternehmensabläufe und
- 4) Umsetzungshemmnisse und Unterstützungsbedarf in den Maßnahmenbereichen.

Um einen hohen Rücklauf zu erreichen wurde die Umfrage im Zeitraum März 2022 bis April 2022 über mehrere Kanäle versendet: gezielt an ausgewählte Logistikunternehmen, frei zugänglich über den jeweiligen Kanal des Fraunhofer IIS bei den Social Media-Plattformen LinkedIn, XING und Twitter, sowie in Form zweier Pressemitteilungen (Fokus Logistik und Fokus Nachhaltigkeit).

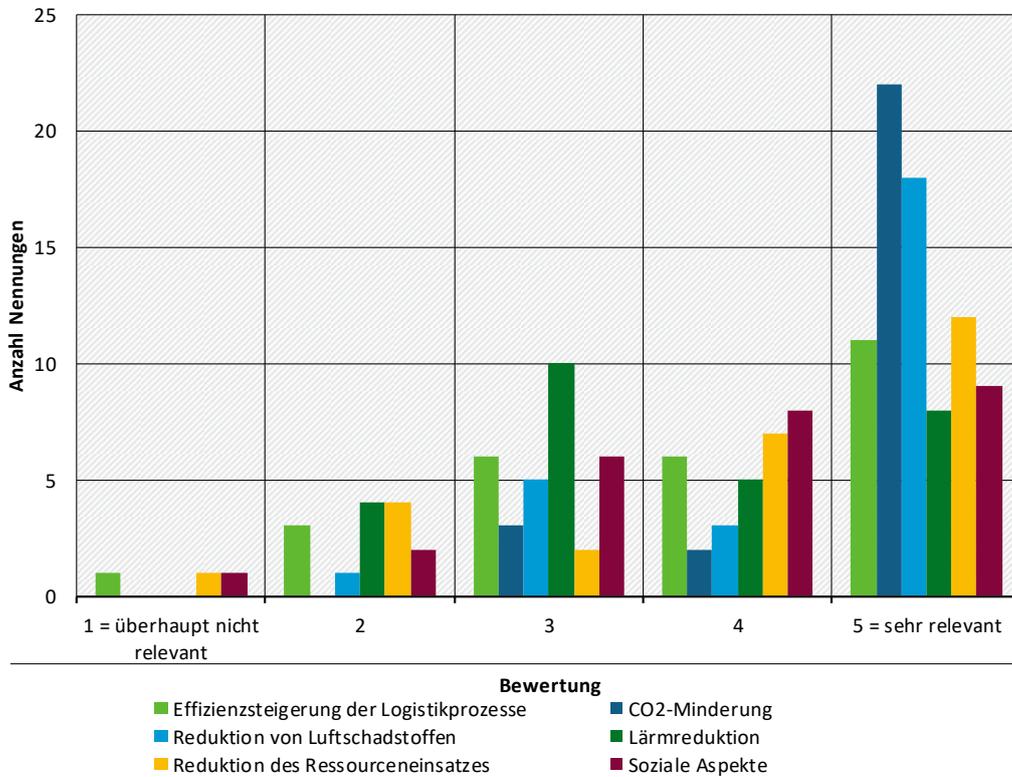
Insgesamt ist anzumerken, dass die Unternehmensbeteiligung trotz der verschiedenen Kanäle und jeweiliger Erinnerungen über die Kanäle mit knapp 100 Teilnehmenden auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau liegt, und der Anteil vollständig ausgefüllter Fragebögen nochmal weit darunter zu verorten ist. Dies deckt sich mit Erfahrungen aus ähnlich gelagerten Studien⁶. Im Folgenden wird die Einschätzung der Unternehmen zum Status quo gezeigt, die anderen Aspekte der Umfrage finden sich in Kapitel 3.

Die Abbildung 10 zeigt die Einschätzung der befragten Unternehmen, welche Ziele aus ihrer heutigen Sicht mit einer nachhaltigen Logistik erreicht werden können. Dabei zeigt sich, dass die Minderung von CO₂-Emissionen und von Luftschadstoffen am häufigsten als sehr relevant eingeschätzt wurde.

⁶ Vgl. Abschlussbericht zum Projekt „Handlungsoptionen für eine ökologische Gestaltung der Transportmittelwahl im Güterfernverkehr“ von 2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/handlungsoptionen-fuer-eine-oekologische-gestaltung>

Abbildung 10: Einschätzung der befragten Unternehmen, welche Ziele aus ihrer heutigen Sicht mit einer nachhaltigen Logistik erreicht werden können

Welche Ziele können Ihrer Meinung nach allgemein mit einer nachhaltigen Logistik erreicht werden?



n = 27

Quelle: Unternehmensbefragung

3 Handlungsansätze nachhaltiger Logistik

3.1 Übersicht der Literaturrecherche

Im Rahmen einer detaillierten Literaturrecherche wurden Suchanfragen auf unterschiedlichen Plattformen nach ausgewählten Schlagworten durchgeführt. Weitere Quellen aus bestehenden Literatursammlungen der Bietergemeinschaft wurden zusätzlich ergänzt. Somit wurden Stand Oktober 2020 insgesamt 198 Quellen mit Veröffentlichungsdatum ab 2010 gesammelt, mit dem Ziel, ein umfassendes Bild von Ansätzen grüner Logistik bei gleichzeitig größtmöglicher Aktualität zu zeichnen. Mehr als die Hälfte der Quellen wurde innerhalb der letzten fünf Jahre veröffentlicht, was die Aktualität des Themas verdeutlicht. Mithilfe des Literaturverwaltungsprogramms *zotero* wurden alle Quellen inkl. relevanter Informationen zu Autoren, Art der Veröffentlichung und Medium erfasst und zur späteren Zuordnung verschlagwortet. Schlagworte orientieren sich hierbei an der obersten Ebene nachfolgend benötigter Kategorien für die Bearbeitung der Arbeitspakete 2-5 („Gütergruppen“, „Netzwerk“, „Supply Chain“, „Unternehmensebene“). Die Wissensgrundlage des Projekts bilden insbesondere Informationen aus (wissenschaftlichen) Fachjournalen. Des Weiteren wurden Fachbücher, graue Literatur, bspw. Berichte, Konferenzbeiträge u.Ä. sowie wenige Webseiten und Zeitungsartikel aufgenommen. Eine detaillierte Literaturübersicht ist dem Anhang beigelegt (siehe Anhang A5).

Aus 198 Quellen wurden 45 Einträge als besonders relevant hinsichtlich ihrer Aussage zu Umweltwirkungen und Detaillierung der Maßnahmen/Konzepte bewertet und gesondert aufbereitet. Im Zuge dessen erfolgte eine Zuordnung nach folgenden Kriterien (Mehrfachzuordnungen sind teilweise enthalten):

Tabelle 6: Übersicht der Zuordnungskategorien der Sekundärquellen

Kriterium	Ausprägungen (Anzahl erfasster Quellen)
Bereich	Supply Chain (31), Netzwerk (25), Unternehmensebene (15), Gütergruppen (20)
Maßnahmenwirkung	Vermeidung (29), Verlagerung (21), Effizienzsteigerung (31), Energieträger/-erzeugung/-bedarf (9)
Wirkung auf	Verpackung (8), Gebäude (11), Fahrzeuge (39), Nachfrage (8)
Umweltwirkung	THG (43), Lärm (12), Städtische NOX (15), Städtische PM (11)
Zuordnung Supply Chain	Beschaffung (8), Lagerlogistik (15), Distribution (24), Transport (40)
Zuordnung Netzwerk	Nähräumlich (16), Regional (13), Rural (5), Urban (17), Nachtlogistik (8), Fernräumlich (24)
Zuordnung Unternehmensebene & Gütergruppen/Branchen	Häufig keine exakte Zuordnung/Aussage zu spezifischer Unternehmensgröße und Branche
Region	DE (21), EU (25), andere Regionen (21)

Diese Zuordnung und Kategorisierung der Literatur diente der Vorbereitung der Inhaltsanalyse und Identifizierung konkreter Maßnahmen und Lösungskonzepte.

3.2 Definition von Maßnahmen für die weitere Untersuchung

Mithilfe oben beschriebener Literaturkategorisierung wurden 92 einzelne Maßnahmen extrahiert und gesondert aufbereitet. Aufbauend auf den Projektzielen wurde ein Maßnahmen-Template für die Konkretisierung und Detaillierung der Maßnahmen in tabellarischer Form erstellt. Folgende Informationen wurden bewertet, bzw. zugeordnet:

Tabelle 7: Übersicht bewerteter Kriterien der Maßnahmen und deren Ausprägungen

● Maßnahme inkl. Kurzbeschreibung	
● Zeithorizont:	kurz-, mittel-, langfristig
● Ranking positiver Umweltwirkungen:	1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch
● Relevante Zwischengrößen:	Transportvolumen, Anteil Verkehrsträger, Anteil Fahrzeugsegmente/Verkehrsmittelwahl, Fahrzeugauslastung, Fahrzeuggröße, Fahrzeugeffizienz, alternative Antriebe, spez. Verbrauch Lkw, spez. CO ₂ -Emissionen Zug-km, spez. CO ₂ -Emissionen Lkw, spez. CO ₂ -Emissionen Schiff, spez. CO ₂ -Emissionen Flugzeug, CO ₂ -Emissionen Umschlag, Lagerauslastung, Lagerfläche, spez. CO ₂ -Ausstoß Lager, spez. CO ₂ -Ausstoß Kühllager, CO ₂ -Emissionen pro Verpackungsmasse, Anteil recyclingfähiger Materialien, Verpackungsvermeidung
● Adressierte Stakeholder:	Kommunen, Stadtplanung, Unternehmen, Verlader, Einzelhandel, Investoren, Logistikdienstleister, Häfen, Reedereien, Staat, Endkunden etc.
● Maßnahmenreife:	Konzeptphase, Pilotphase, Verstetigung
● Transport- und Logistikkonzept:	Modal Split, Fahrzeugauslastung, Routenoptimierung, Reduktion von Leerfahrten, Ladungsträger, Netzwerkoptimierung, Vermeidung/Verminderung von Fahrten, Transportbündelung, Stauvermeidung, Kombiniertes Verkehr, Verlangsamung
● Fahrzeuge:	Fahrzeuggeometrie, Leichtbau, Fahrzeugeffizienz, alternative Kraftstoffe
● Gebäude:	Erneuerbare Energien, effiziente Tageslichtnutzung, Wärmedämmung, Heiz-/Kühlsysteme, Bauweise des Gebäudes, Flächenverbrauch, energieeffiziente LED-Beleuchtung
● Verpackungsmanagement:	Vermeidung von Transportverpackung, Mehrwegverpackungssysteme, Recycling
● Organisation:	Papierlose Prozesse, Mitarbeiterqualifizierung, Beschaffung umweltfreundlicher Materialien, Nachhaltigkeitskriterien bei der Auswahl von Partnern, Preisgestaltung, Kommissionier-Strategien, effiziente Lagerverwaltung

Durch eine anschließende Zuordnung der Maßnahmen auf zwei Detailierungsebenen wurden eine systematische Aufbereitung und Beschreibung von Einflussgrößen für eine spätere Bilanzierung vorbereitet:

Tabelle 8: Übersicht der Ebenen und Zuordnung abgeleiteter Maßnahmen als Zwischenergebnis

Ebene 1 (Anzahl zugeordneter Maßnahmen)	Ebene 2 (Anzahl zugeordneter Maßnahmen)	
Alternative Antriebe (10)	Lkw-Antrieb (5) Schiff-Antrieb (2)	Flugzeug-Antrieb (1) Zug-Antrieb (2)
Effizienz Antrieb/Fahrzeug (17)	Lkw-Effizienz (5) Lkw-Ladefläche (4) Zug-Ladefläche (1) Schiff-Effizienz (2)	Green Shipping (1) Slow Steaming (2) Flugzeug-Effizienz (2)
Effizienz Lager (10)	Bauweise (2) Energie Lager (6)	Ressourceneinsatz Lager (2) Prozessoptimierung Lager (2)
Finanzielle Anreize (3)	Maut (1) Internalisierung (1)	Green Sourcing (1)
Lagernutzung (1)	Standortwahl (1)	
Letzte Meile (9)	B2C/B2B (2) E-Bikes (2)	Nachtlogistik (2) Urbane Logistik (3)
Optimierung Umschlag (3)	Green Ports (2)	Umschlag (1)
(digitale) Prozessoptimierung (12)	Digitalisierung (1) Organisation intern (1) Organisation extern (4)	Crowd Logistics (1) Routing (4) Telematik (1)
Transportbedarf (17)	Auslastung Fahrzeug (2) Green Sourcing (2) Organisation extern (2) Organisation intern (1)	Prozessoptimierung Produktion (2) Lieferbedingung (2) Logistikfläche (4) Standortwahl (3)
Verhalten (3)	Mitarbeitertraining (3)	
Verlagerung Bahn (3)	Kombination ÖPNV und Logistik (1)	Verlagerung Straße-Schiene- Schiff (2)
Verpackung (4)	Verpackung (4)	

Im Nachgang wurden die identifizierten Maßnahmen weiter konsolidiert hinsichtlich der Möglichkeit der Quantifizierung. Die Tabellen 9-19 zeigen die konsolidierten, potenziell quantifizierbaren Maßnahmen, gegliedert nach Ebene 1 mit einer fortlaufenden Nummerierung.

Tabelle 9: Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Effizienz Antrieb/Fahrzeug“

Nr.	Bezeichnung
1	Seitenverkleidung Lkw-Auflieger
2	Autonome Fahrzeuge
3	Abgeschrägtes Heck und Winglets am Lkw-Auflieger
4	Klimaneutrale Versandoptionen (Green Shipping, Clean Cargo)
5	Lang-Lkw
6	Anpassung Lkw in Mehrkammer-Fahrzeuge
7	Lkw-Erweiterung Ladekapazität
8	Vans, Leichtbau und Vergrößerung der Ladefläche
9	Langzug 740mPlus
10	Schiff (Skysail)
11	Optimierte Hydrodynamik bei Schiffen
12	Slow Steaming-Wirkung auf gesamte Flotte
13	Slow Steaming-Wirkung auf einzelne Schiffe und Kosten
14	Flugzeug, optimierte Triebwerke
15	Optimierte Bauteile des Flugzeugs

Tabelle 10: Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Alternative Antriebe“

Nr.	Bezeichnung
16	Verbot von Fahrzeugen mit hohen Emissionswerten und Ersetzen durch klimaschonende Alternativen
17	Lkw Flottenerneuerung (Hybrid)
18	Lkw Flottenerneuerung (Elektro)
19	Lkw Flottenerneuerung (OH)
20	Brennstoffzellen Lkw
21	LNG Schiff
22	Brennstoffzelle Schiff
23	Power-to-Liquid Flugzeug
24	Alternative Antriebe für Züge (Batterieelektrisch oder Brennstoffzelle)
25	Schiene (Ausbau Elektro)

Tabelle 11: Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Letzte Meile“

Nr.	Bezeichnung
26	Direkte Auslieferung an den Kunden
27	Lieferfahrzeug LNF(Elektro) für Lebensmittel
28	E-Lkws für Nachtlogistik
29	Lieferung außerhalb von Stoßzeiten
30	Transport via E-Bike
31	Lastenräder
32	Nutzung von Schiffen in der städtischen Logistik
33	Intelligente Servicestationen

Tabelle 12: Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Verlagerung Bahn“

Nr.	Bezeichnung
34	Nutzung von ÖPNV-Strecken
35	Verlagerung von Straße auf Schiene
36	Optimierung Kombiniertes Verkehr: Straße-Schiene-Schiff

Tabelle 13: Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Optimierung Umschlag“

Nr.	Bezeichnung
37	Optimierung Modal Split
38	Häfen - Implementierung von Landstrom
39	Häfen - Reduktionspotenzial für Häfen aus kombinierten Maßnahmen

Tabelle 14: Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Effizienz Lager“

Nr.	Bezeichnung
40	Effiziente Temperatursteuerung in Gebäuden
41	Intelligente Beleuchtungssteuerung
42	Nachhaltige Gebäudenutzung
43	Effiziente Inhouse Logistik
44	Gebäudestandards für Lagerlogistik

Tabelle 15: Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Lagernutzung“

Nr.	Bezeichnung
45	Dezentralisierung von Produktion und Lagerhaltung
38	Häfen - Implementierung von Landstrom

Tabelle 16: Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „(Digitale) Prozessoptimierung“

Nr.	Bezeichnung
46	Zentrale Organisation von Transporten im Unternehmen
47	Intelligente Telematik
48	Synchromodality
49	Offene Lager- und Transportnetzwerke
50	Crowd-shipping
51	Steuerung von Frachtrouten (durch Digitalisierung)
52	Routenoptimierung in Echtzeit
53	intelligentes Ladungssystem

Tabelle 17: Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Finanzielle Anreize“

Nr.	Bezeichnung
54	Internalisierung der Schadstoff-/Umweltwirkung (THG)
55	Einführung & Ausweitung von Gebühren für Straßennutzung, Bahntrassen und Häfen

Tabelle 18: Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Transportbedarf“

Nr.	Bezeichnung
56	Local Sourcing
57	Lieferantenauswahl nach Nachhaltigkeitskriterien
58	Localisation and nearshoring
59	Verlagerung der Produktionsstandorte
60	Einrichtung städtischer Umschlags-/Verteilungszentren
61	3D-printing
62	Dematerialisation
63	Öffentliche Darlegung von Liefer- und Serviceplänen (DSPs)
64	Einbeziehen und Reservieren von optimalen Logistikstandorten in der Stadt- und Regionalplanung

Nr.	Bezeichnung
65	Mobile Logistiklager
66	Offroad Ladezonen

Tabelle 19: Übersicht der konsolidierten Maßnahmen im Cluster „Finanzielle Anreize“

Nr.	Bezeichnung
67	Neue Verpackungssysteme
68	Effiziente Verpackung und flexible Anpassung an Lieferfahrzeuge

Obwohl sich die vorgenannten Begriffe teilweise mit den für die Kategorisierung der Literatur verwendeten Begriffen überschneiden, handelt es sich hier um eine separate und unabhängige Kategorisierung. Die Zuordnung der Maßnahmen zu den jeweiligen Ebenen ist den Maßnahmensteckbriefen in Kapitel 6 zu entnehmen. In diesen Steckbriefen sind die Einzelmaßnahmen detailliert beschrieben, qualitativ bewertet und ihre Wirkbereiche und Umweltwirkungen dargestellt. Außerdem sind adressierte Stakeholder und ein entsprechender Zeithorizont aufgeführt. Die Zuordnung zu Bereichen der Supply Chain und/oder einem Netzwerktyp dienten als Vorbereitung nachfolgender Arbeitspakete (siehe beispielhaft Abbildung 11).

Abbildung 11: Beispielhafte Darstellung eines Maßnahmensteckbriefes

Intelligente Servicestationen	
Intelligente Services-Stationen als Hubs für Last-Mile-Delivery. Diese dienen als gemeinsame Anlaufstation für verschiedene Zusteller, die bevorzugt mit emissionsarmen Fahrzeugen wie etwa Lastenfahrrädern oder E-Vans ausliefern. Die Zustellraten und das Zeitmanagement verbessern sich deutlich und schlagen sich in geringeren THG-Emissionen nieder, ebenso wie bessere Auslastungen und geringere Strecken.	
Auswirkung auf Routenoptimierung, Netzwerkoptimierung, Verminderung von Fahrten und Transportbündelung	
Umweltwirkung	Durch Einsatz der Servicestationen und der Zusammenlegung von Lieferungen können 24 % THG-Emissionen gespart werden. Beispiele aus London zeigen, dass intelligente Servicestationen in Verbindung mit Cargo Tricycles zu einer CO ₂ -Reduktion von 20 % pro Paket führen, bzw. sogar 40 %, wenn E-Vans auf der letzten Meile eingesetzt werden. Die Anzahl von Fahrzeugen, die in die Stadt fahren, können reduziert werden und Auslastungen verbessert werden. Ebenso werden Gesamtstrecken einzelner Fahrzeuge verringert.
Adressierte Stakeholder	KEP-Branche
Zeithorizont	mittelfristig
Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: selektiv
Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr / Schnittstelle zum Regionalverkehr
<i>Literaturangabe:</i> Conway, A. (2011): <i>Urban micro-consolidation and last mile goods delivery by freight-tricycle in Manhattan: Opportunities and challenges</i>	

Intelligente Servicestationen

Faccio, M., Gamberi, M. (2015): New City Logistics Paradigm: From the "Last Mile" to the "Last 50 Miles" Sustainable Distribution. In: Sustainability 15, S. 14873-14894

Awwad, M., Shekar, A., Iyer, A. (2018): Sustainable Last-Mile Logistics Operation in the Era of E-Commerce. In: roceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Washington D.C.

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IIS

Eine Übersicht der Maßnahmensteckbriefe ist, sortiert nach Ebene 1 und 2, in Kapitel 6 beigefügt. Diese wurden im Laufe des Projekts mit zunehmendem Erkenntnisgewinn um weitere Informationen ergänzt und einer Aktualitätsprüfung unterzogen.

Aussagen zum Grad der Umweltwirkungen und über das Gesamtpotenzial sind aus der Literatur nicht immer möglich, da diese aus teilweise nur einer qualitativen Beschreibung von Effekten oder Daten zu Einzelfallbeispielen bedingt ableitbar sind. Daher wurde zunächst eine Bilanzierungsstruktur entwickelt, mithilfe der Aussagen zur Eignung einzelner Maßnahmen getroffen werden sollen. Dies führte zu einer gezielten Nachrecherche von Datenlücken. Nachdem trotz Nachrecherche nicht zu jeder Einzelmaßnahme quantitative Daten über Umweltwirkungen verfügbar waren, erforderte es ein zweites Vorgehen für solche Maßnahmen, deren Wirkweisen nicht quantifizierbar sind, so bspw. Maßnahmen im Bereich Mitarbeiterschulung oder Unternehmensorganisation. Zu deren Potenziale wurden qualitative Einschätzungen durch das Projektteam, basierend auf zugehöriger Literatur getroffen und in einer Umfrage evaluiert.

3.3 Systematisierungsansätze für die Maßnahmen

3.3.1 nach Logistikbereichen

Im Rahmen der Entwicklung eines Bilanzierungskonzepts in AP1 wurden Zwischengrößen aus einzelnen Maßnahmen abgeleitet, die zur Beschreibung der Umwelteffekte in der Literatur verwendet werden. Die Zuordnung einzelner Supply-Chain-Prozesse erlaubt die Identifizierung von (teils messbaren) Zwischengrößen für den Transport, die Lagerlogistik, Beschaffungsprozesse und Verpackungen:

- ▶ Transport: Einflussgrößen auf Umweltwirkungen unterscheiden sich je nach spezifischen Eigenschaften und der Auswahl von Verkehrsmitteln sowie der Kombination aus Verkehrsträgern und Streckeneigenschaften. So beziehen sich relevante Zwischengrößen im Bereich der Verkehrsmittel v. a. auf die Größe eingesetzter Verkehrsmittel und entsprechende Fahrzeugsegmente, die Effizienz des Fahrzeugs hinsichtlich baulicher Gegebenheiten und alternativen Antrieben. Zudem entstehen spezifische CO₂-Emissionen für einzelne Verkehrsmittel, die es zu beachten gilt. Zur Bilanzierung von Emissionen des Transports werden die verkehrlichen Parameter Transportleistung, Fahrleistung und Auslastung verwendet. Bezüglich des Emissionsverhaltens der Verkehrsmittel werden spezifische Emissionsfaktoren (pro Fahr- und Transportleistung) genutzt.
- ▶ Lagerlogistik: Neben dem flächenspezifischen Emissionsausstoß eines Lagers, bzw. eines Kühllagers sind Umweltwirkungen in der Lagerlogistik abhängig von der Lagerauslastung und der absoluten Lagerfläche. Der spezifische CO₂-Ausstoß eines Lagers setzt sich unter anderem aus dem Energieverbrauch für Beleuchtung und Temperaturregelung sowie für intralogistische Prozesse zusammen.

- ▶ **Verpackung:** Die Auswahl des Materials (Masse und Volumen) verwendeter Verpackungen beeinflussen durch die Optimierung der Transportkapazitäten und das Transportgewicht die Emissionen von Transporten und wirken indirekt auf logistische Prozesse.
- ▶ **Beschaffung:** Im Bereich Beschaffung entstehen keine direkten Umweltwirkungen, jedoch können Emissionen der Transporte, Lagerlogistik und Verpackung durch bspw. die gezielte Auswahl umweltorientierter Kooperationspartner, beeinflusst werden. Neben einer Lieferantenauswahl nach Nachhaltigkeitskriterien, gemessen bspw. an Verwendung erneuerbarer Energien und der CO₂-Bilanz von Lagerstätten oder dem Einsatz alternativer Antriebe im Transport sowie hohe Fahrzeugauslastungen und -effizienz, können durch die Beschaffung von Waren aus der geografischen Nähe Transportkilometer eingespart werden.

Diese Zwischengrößen wurden für die Entwicklung einer Bilanzierungsstruktur bestmöglich berücksichtigt, was jedoch nicht immer vollumfänglich möglich war. Im Rahmen dessen wurden Daten aus amtlichen Statistiken hinsichtlich deren Eignung zur Bilanzierung der Maßnahmen geprüft. Herausforderungen ergeben sich durch Unterschiede in Aktualität, Datenbezug und Erhebungsmethoden verfügbarer Statistiken. So werden Daten teils nach Gütergruppen (NST-2007), teils nach Branchen (WZ08) aufgeschlüsselt, welche keine eindeutige Deckung zulassen. Zudem lassen sich manche Daten nur über eigene Berechnungen auf Grundlage bestehender Immobilien- (L.Immo⁷) oder Unternehmensdatenbanken (Hoppenstedt, Amadeus), Modellen (TREMOD) und Annahmen dazu abbilden. Nachfolgende Tabelle zeigt einen Auszug der Zwischengrößen und mögliche Daten, um diese abzubilden. Aufgrund unterschiedlicher Quellen sind statistische Daten zur Abbildung von Zwischengrößen teilweise mehrfach aufgelistet. Es wurde versucht, bestehende Lücken über Studienergebnisse und im Austausch mit Branchenexperten bestmöglich zu füllen.

⁷ Interaktive Research-Plattform für Logistikkimmobilien, die aktuelle Markt- und Standortdaten zu den 23 deutschen Logistikregionen enthält. Diese Informationen bilden eine fundierte Grundlage für Immobilien- und Standortbewertungen. Eine eigens entwickelte Datenbank mit über 9.000 erfassten Logistikkimmobilien in Deutschland dient als Grundlage für die Ableitung regionalspezifischer Flächenbedarfe.

Tabelle 20: Übersicht potenzieller Daten zur Abdeckung von Zwischengrößen

Bereich	Zwischengröße	Herausgeber	Statistik	Aktualität	Aufschlüsselung
Transport	Durchschnittliche Entfernung	Kraftfahrt-Bundesamt	Verkehr europäischer Lastkraftfahrzeuge (VE) - Güterbeförderung - VE4	2018	NST-2007
Transport	Durchschnittliche Entfernung	Kraftfahrt-Bundesamt	Verkehr europäischer Lastkraftfahrzeuge (VE) - Güterbeförderung - VE4	2018	NST-2007
Transport	Anzahl Transporte	Kraftfahrt-Bundesamt	Verkehr europäischer Lastkraftfahrzeuge (VE) - Güterbeförderung - VE4	2018	NST-2007
Transport	Anzahl Transporte	Kraftfahrt-Bundesamt	Verkehr europäischer Lastkraftfahrzeuge (VE) - Güterbeförderung - VE4	2018	NST-2007
Transport	Masse pro Transport	Kraftfahrt-Bundesamt	Verkehr europäischer Lastkraftfahrzeuge (VE) - Güterbeförderung - VE4	2018	NST-2007
Transport	Masse pro Transport	Kraftfahrt-Bundesamt	Verkehr europäischer Lastkraftfahrzeuge (VE) - Güterbeförderung - VE4	2018	NST-2007
Transport	Transportleistung	Kraftfahrt-Bundesamt	Verkehr europäischer Lastkraftfahrzeuge (VE) - Güterbeförderung - VE4	2018	NST-2007
Transport	Transportleistung	Kraftfahrt-Bundesamt	Verkehr europäischer Lastkraftfahrzeuge (VE) - Güterbeförderung - VE4	2018	NST-2007
Transport	Fahrzeugauslastung	Kraftfahrt-Bundesamt	Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD) - Verkehrsaufkommen - VD1	2018	NST-2007
Transport	Anteil Bahn	Statistisches Bundesamt	Verkehr in Zahlen	2018	NST-2007
Transport	Anteil Wasserwege – Binnenschiff	Statistisches Bundesamt	Verkehr in Zahlen	2018	NST-2007
Transport	Anteil Straße	Statistisches Bundesamt	Verkehr in Zahlen	2017	NST-2007
Transport	Anteil Wasserwege – Seeschiff	Statistisches Bundesamt	Verkehr in Zahlen	2018	NST-2007
Transport	Anteil Bahn	Eurostat	Beförderte Güter nach Gütergruppe - ab 2008 nach NST 2007 [rail_go_grpgood]	2018	NST-2007
Transport	Anteil Straße	Eurostat	Innerstaatlicher jährlicher Straßengüterverkehr nach Gütergruppe und Verkehrsart (1 000 t, Mio. tkm), ab 2008 [road_go_na_tggt]	2019	NST-2007

Bereich	Zwischengröße	Herausgeber	Statistik	Aktualität	Aufschlüsselung
Transport	Anteil Straße	Eurostat	Innerstaatlicher jährlicher Straßengüterverkehr nach Gütergruppe und Verkehrsart (1 000 t, Mio. tkm), ab 2008 [road_go_na_tggt]	2018	NST-2007
Transport	Anteil Wasserwege – Binnenschiff	Eurostat	Verkehr nach Güterart (von 2007 mit NST2007) [iww_go_atygo]	2019	NST-2007
Transport	Anteil Wasserwege – Binnenschiff	Eurostat	Verkehr nach Güterart (von 2007 mit NST2007) [iww_go_atygo]	2018	NST-2007
Transport	Anteil Bahn	Destatis	Güterverkehrsstatistik der Eisenbahn	2019	NST-2007
Transport	Anteil Bahn	Destatis	Güterverkehrsstatistik der Eisenbahn	2019	NST-2007
Transport	Anteil Wasserwege – Binnenschiff	Destatis	Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt	2019	NST-2007
Transport	Anteil Wasserwege – Binnenschiff	Destatis	Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt	2019	NST-2007
Transport	Anteil Wasserwege – Binnenschiff	Destatis	Güterverkehr - Beförderungsleistung inländischer Lastkraftwagen	2018	NST-2007
Transport	Anteil Bahn	Destatis	Güterverkehr - Beförderungsleistung inländischer Lastkraftwagen	2018	NST-2007
Transport	Anteil Straße	Destatis	Güterverkehr - Beförderungsleistung inländischer Lastkraftwagen	2018	NST-2007
Transport	Spez. CO ₂ -Emissionen Zug	Umweltbundesamt	TREMOD 6.03	2018	NST-2007
Transport	Spez. CO ₂ -Emissionen LKW	Umweltbundesamt	TREMOD 6.04	2018	NST-2007
Transport	Fahrzeugauslastung	Kraftfahrt-Bundesamt	Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD) - Verkehrsaufkommen - VD1	2018	WZ 2008
Transport	Fahrzeugauslastung	Kraftfahrt-Bundesamt	Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD) - Verkehrsaufkommen - VD1	2018	WZ 2008
Transport	Fahrzeugsegment	Bundesanstalt für Straßenwesen	Tabellenanhang zur Inländerfahrleistung	k.A.	WZ 2008

Bereich	Zwischengröße	Herausgeber	Statistik	Aktualität	Aufschlüsselung
Transport	Fahrzeugsegment	Bundesanstalt für Straßenwesen	Tabellenanhang zur Inländerfahrleistung	k.A.	WZ 2008
Transport	Fahrzeugsegment	Bundesanstalt für Straßenwesen	Tabellenanhang zur Inländerfahrleistung	k.A.	WZ 2008
Transport	Fahrzeugsegment	Bundesanstalt für Straßenwesen	Tabellenanhang zur Inländerfahrleistung	k.A.	WZ 2008
Transport	Fahrzeugsegment	Bundesanstalt für Straßenwesen	Tabellenanhang zur Inländerfahrleistung	k.A.	WZ 2008
Transport	Fahrzeugsegment	Bundesanstalt für Straßenwesen	Tabellenanhang zur Inländerfahrleistung	k.A.	WZ 2008
Transport	Durchschnittliche Entfernung	Statistisches Bundesamt	Aus- und Einfuhr (Außenhandel)	2019	WZ 2008
Lagerei	CO ₂ -Ausstoß Lager	DSLVL	Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik	Allg. keine Aufschlüsselung nach Branchen oder Gütergruppen	
Lagerei	CO ₂ -Ausstoß Kühllager	DSLVL	Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik	Allg. keine Aufschlüsselung nach Branchen oder Gütergruppen	
Lagerei	Mittl. Auslastung im Lager	Amadeus	Eigene Berechnung auf Grundlage von Amadeus-Daten	2020	WZ 2008
Lagerei	Verweildauer im Lager	Amadeus	Eigene Berechnung auf Grundlage von Amadeus-Daten	2020	WZ 2008
Lagerei	Mittlere Lagergröße	L.Immo	Eigene Berechnung / L.Immo	2020	WZ 2008
Sonstige	Ersetzbarkeits-Index	Amadeus	Eigene Berechnung auf Grundlage von Amadeus-Daten	2020	WZ 2008

3.3.2 nach Supply-Chain-Stufen

Unter Supply Chain werden zunächst unternehmensübergreifende Netzwerke verstanden, die miteinander in Wechselwirkung stehen und durch Informations-, Geld- sowie Güterwege vom Rohstofflieferanten bis zum Endkonsumenten beschrieben werden können. (vgl. (Tripp, 2019), 40ff.) Zur Vereinfachung wird hier nicht von einem Netzwerk, sondern einer linear verlaufenden Logistikkette ausgegangen, die „als eine Folge von Transport-, Lager- und Produktionsprozessen dargestellt werden kann“, wohlwissend, dass die Praxis Netzwerk-Strukturen aufweist. ((Arnold et al., 2008), S. 4) Zu den Logistischen Prozessen zählen Transport-, Umschlags-, Kommissionier-, Lager- und Verpackungsprozesse sowie Informations- und Kommunikationsprozesse. (vgl. (Arnold et al., 2008), S. 5ff)

Aufbauend auf der Kategorisierung der Maßnahmen in AP 1 wurden relevante Ergebnisse mithilfe einer Zuordnung entlang der Supply Chain zu den Versorgungsprozessen Lager inkl. Kommissionierung, Transport inkl. Umschlag, Beschaffung (enthält u. a. Informations- und Kommunikationsprozesse) und Verpackung extrahiert, welche in der nachfolgenden Tabelle (siehe Tabelle 21) mit einer entsprechenden Zuordnung zu Maßnahmenebenen (entsprechend AP1, Tabelle 8) beschrieben sind. Eine Zuordnung jeder Einzelmaßnahme kann dem jeweiligen Steckbrief entnommen werden. Zusammengefasst kann beobachtet werden, dass sich Maßnahmen im Bereich Beschaffung vor allem auf die gezielte Auswahl von Lieferanten abhängig von deren CO₂-Performance und deren Standortnähe konzentrieren. Zudem werden Potenziale in der Organisationszentralisierung von Transporten und der Internalisierung von Umweltwirkungen der Fahrzeuge zur Berücksichtigung volkswirtschaftlicher Kosten eines Transportes gesehen. Der Großteil identifizierter Maßnahmen kann dem Bereich Transport zugeordnet werden, wobei besonders Maßnahmen für Straßenverkehre stark vertreten sind. Konzepte zur Steigerung der Fahrzeugeffizienz und alternative Antriebe sind über alle Verkehrsträger hinweg vertreten. Maßnahmen aus dem Bereich Verpackung haben vor allem Effekte auf Transportgewicht und Fahrzeugtypen. Ein weiterer Bereich ist die Lagerlogistik, in der Umweltwirkungen durch Effizienzsteigerung und Energieeinsparungen abgeleitet werden können.

Tabelle 21: Ableitung von Maßnahmen aus der Zuordnung entlang der Supply Chain

Ebene 1	Ebene 2	
Alternative Antriebe	Lkw-Antrieb Schiff-Antrieb	Flugzeug-Antrieb Zug-Antrieb
Effizienz Antrieb/Fahrzeug	Lkw-Effizienz Lkw-Ladefläche Zug-Ladefläche Schiff-Effizienz	Green Shipping Slow Steaming Flugzeug-Effizienz
Letzte Meile	B2C E-Bikes	Nachtlogistik Urbane Logistik
Verlagerung Bahn/Schiff	Kombination ÖPNV und Logistik	Verlagerung Straße-Schiene-Schiff
Optimierung Umschlag	Green Ports	Umschlag

	Ebene 1	Ebene 2
ABLEITUNG	<p>Alle Maßnahmen aus den Ebenen ‚Alternative Antriebe‘, ‚Effizienz Antrieb/Fahrzeug‘, ‚Letzte Meile‘, ‚Verlagerung Bahn‘ und ‚Optimierung Umschlag‘ können TRANSPORTPROZESSEN zugeordnet werden. Bei alternativen Antriebsformen wird zwischen Verkehrsträgern und Fahrzeugtypen unterschieden. Verkehrsträgerübergreifende Maßnahmen beziehen sich vermehrt auf die Optimierung des Modal Splits, Routenoptimierungen und -regulierungen sowie intelligente Systeme und Kooperationen durch Transparenz in den Transportprozessen. Maßnahmen der Letzten Meile schließen ebenfalls Fahrzeugalternativen zum Lkw (bspw. Lastenrad, Schiffe, ÖPNV) vor allem im städtischen Umfeld ein oder beziehen sich auf Regulierungen der Lieferzeiten und Fahrverboten in Innenstädten.</p>	

	Ebene 1	Ebene 2
	Effizienz Lager	Bauweise Kühlsystem Energie Lager Ressourceneinsatz Prozessoptimierung Lager Lager
	Lagernutzung	Standortwahl
ABLEITUNG	<p>Alle Maßnahmen aus den Ebenen ‚Effizienz Lager‘ und ‚Lagernutzung‘ können PROZESSEN IM LAGER zugeordnet werden. Diese lassen sich weiter unterteilen in Maßnahmen, die das Gebäude an sich betreffen und solche, die Prozesse in einem Lager verbessern. Erstere schließen nachhaltige Gebäudestandards, die Nutzung erneuerbarer Energien und intelligenter Energiesysteme ein. Effizienzsteigerungen in der Inhouse-Logistik können bspw. durch automatisierte Vorgänge oder Unternehmenskooperationen für eine gemeinsame Nutzung der Immobilie erzielt werden.</p>	

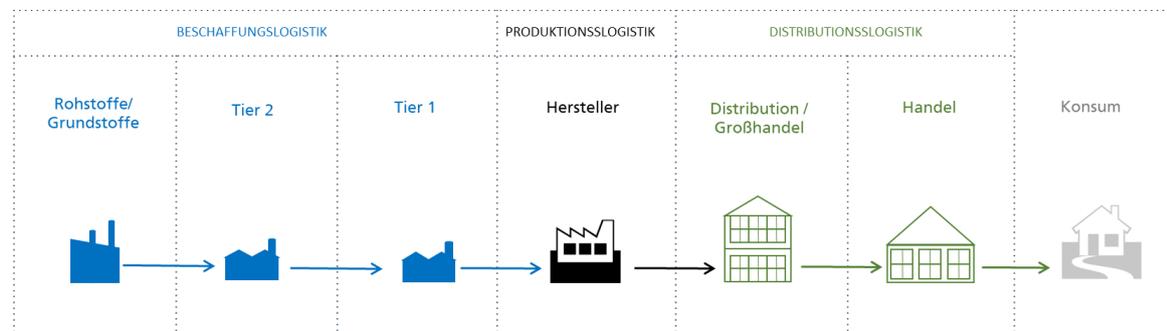
	Ebene 1	Ebene 2
	Finanzielle Anreize	Maut Green Sourcing Internalisierung
	(digitale) Prozessoptimierung	Digitalisierung Crowd Logistics Organisation intern Routing Organisation extern Telematik
	Transportbedarf	Auslastung Fahrzeug Prozessoptimierung Green Sourcing Produktion Organisation extern Lieferbedingung Organisation intern Logistikfläche Standortwahl
ABLEITUNG	<p>Finanzielle Anreize und (digitale) Prozessoptimierungen betreffen vor allem TRANSPORTPROZESSE durch ausgeweitete Gebühren für die Nutzung von Straßen, Bahntrassen und Häfen und die Optimierung von Transportkonzepten. Maßnahmen zum ‚Transportbedarf‘ setzen ebenfalls hier an, bspw. mit der Vermeidung von Leerfahrten oder ineffizienten Fahrten und der Verwendung anliefernder Fahrzeuge für die Distribution. Außerdem können Maßnahmen aus diesen Ebenen dem BEREICH BESCHAFFUNG zugeordnet werden, durch die Auswahl von Dienstleistern nach CO₂-Performance oder Nähe zum Standort, Reduzierung von Sonder-/Eillieferungen und der Internalisierung von Schadstoffwirkungen.</p>	

	Ebene 1	Ebene 2
	Ebene 1	Ebene 2
	Verhalten	Mitarbeitertraining
ABLEITUNG AP 2	Verhaltensmaßnahmen sind in unterschiedlichen Bereichen der Supply Chain zu finden. So kann das Training von Fahrern Auswirkungen auf TRANSPORTPROZESSE haben, während die Sensibilisierung von Mitarbeitern zu nachhaltigen Entscheidungen in BESCHAFFUNGSPROZESSEN führen könne.	

	Ebene 1	Ebene 2
	Ebene 1	Ebene 2
	Verpackung	Verpackung
ABLEITUNG AP 2	Im BEREICH VERPACKUNG werden Maßnahmen eingesetzt, in denen effiziente, flexible Materialien oder neue Systeme (bspw. Mehrweg, Silo) eingesetzt werden, welche indirekt Auswirkungen auf Fahrzeugauslastungen oder Transportgewicht in TRANSPORTPROZESSEN haben.	

Als Grundlage für die Bewertung von Wirkungsweisen entlang einer Versorgungskette, erfolgte die Entwicklung eines vereinfachten Supply-Chain Modells aus zwei Sichtweisen. Einerseits wurde die Supply Chain angelehnt an die Liefer-/ Logistikkette nach (Tripp, 2019) und (Arnold et al., 2008) in ihre einzelnen Stufen vom Rohstoff bis zum Konsum untergliedert:

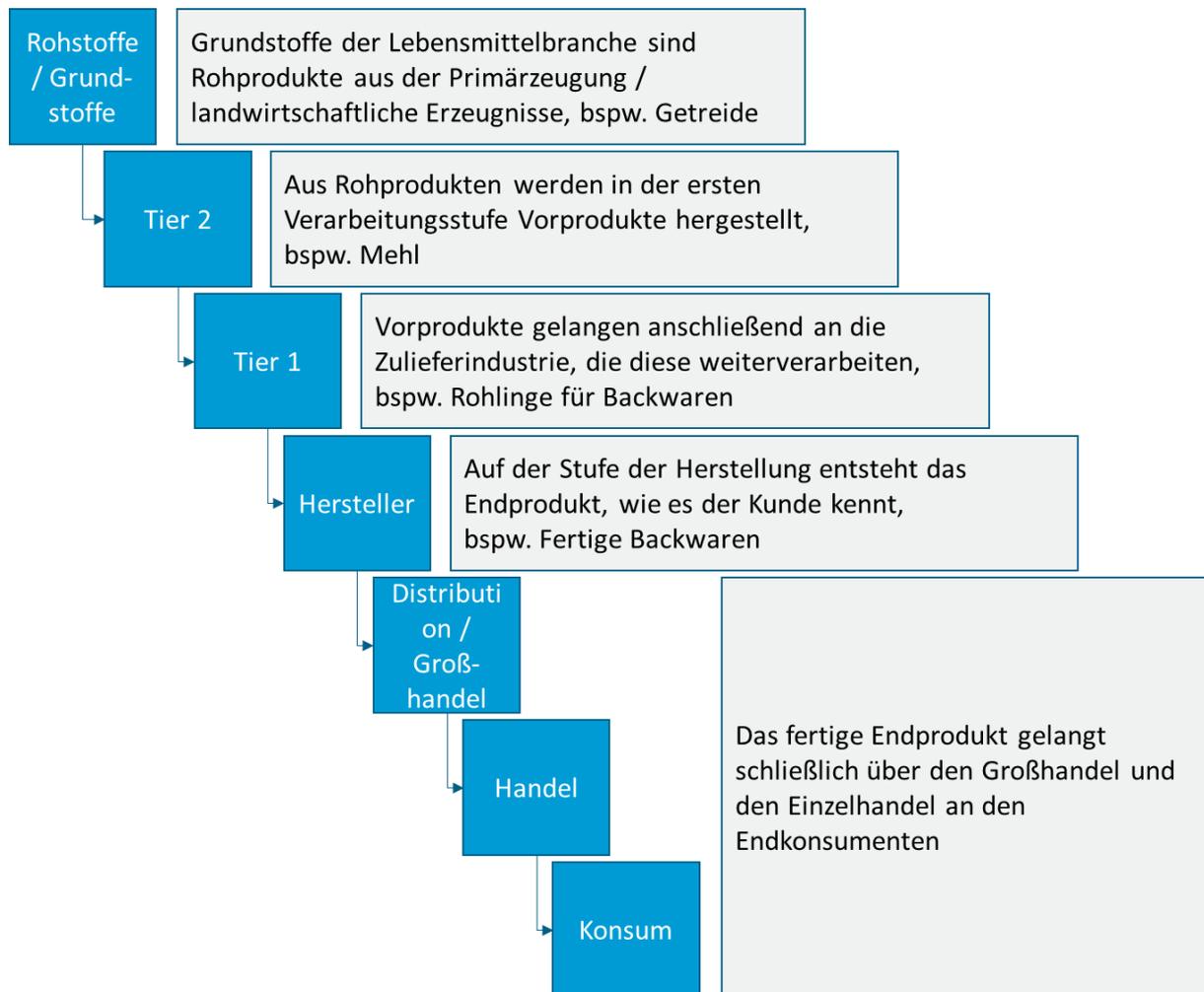
Abbildung 12: Darstellung einer Logistikkette



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Tripp (2019) und Arnold (2008)

Unterschiede im Aufbau dieser Stufen gibt es sowohl zwischen unterschiedlichen Branchen als auch innerhalb einer Branche selbst, abhängig von notwendigen Verarbeitungsschritten vom Rohprodukt zum Endprodukt und der Anzahl und Verteilung der Unternehmen auf der jeweiligen Stufe. Eine branchen- bzw. güterabhängige Differenzierung wurde in diesem Schritt nicht vorgenommen. Nachfolgende Abbildung zeigt wichtige Versorgungsstufen am Beispiel der Lebensmittelbranche:

Abbildung 13: Vereinfachte Darstellung unterschiedlicher Versorgungsstufen am Beispiel der Lebensmittelbranche

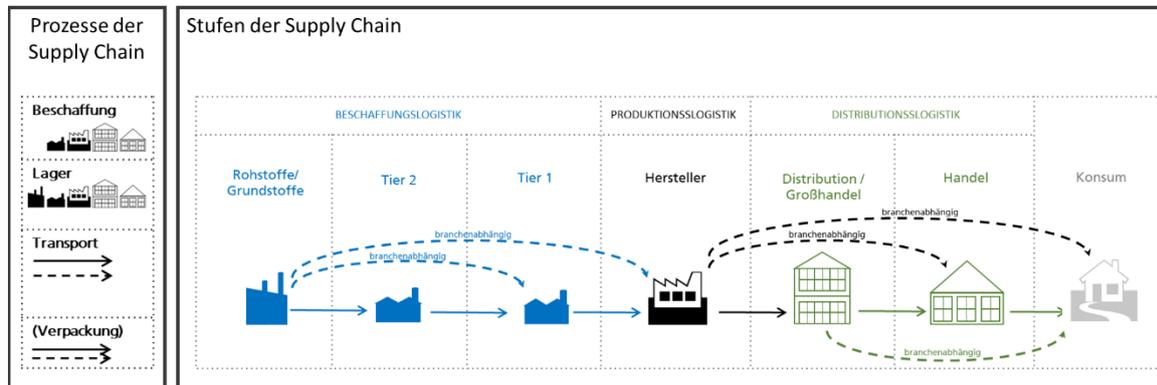


Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IIS

Gleichzeitig wurden Supply Chain-Prozessbereiche unterschieden, die auf oder zwischen diesen Versorgungsstufen auftreten können. Dazu werden besonders Beschaffung, Transport und Lagerung fokussiert. Zudem wurde der Bereich Verpackung ergänzt, da vereinzelt Maßnahmen diesem Bereich zuordenbar sind. Diese beiden Herangehensweisen wurden in einem siebenstufigen Supply Chain Modell zusammengefasst. Anschließend wurden Supply Chain Prozesse (Beschaffung, Transport, Lagerei und Verpackung) diesen sieben generischen Stufen zugeordnet. So finden Beschaffungsprozesse in der Beschaffungslogistik in den Tier-Stufen statt, in der Produktionslogistik (Herstellung) sowie der Distributionslogistik im Groß- und Einzelhandel. Transportprozesse (und Verpackung) finden zwischen allen Stufen der Supply Chain statt. Zur Vereinfachung wurde hier auf zwei Tier-Stufen beschränkt. Lagerprozesse finden sich in allen Stufen außer dem Konsum wieder (siehe Abbildung 14). Eine Betrachtung der Prozesse der Supply Chain ist deshalb relevant, da keine eindeutige Zuordnung aller Maßnahmen zu den zuvor genannten sieben Versorgungsstufen möglich ist. So können beispielsweise Maßnahmen zur Effizienzsteigerung im Lager sowohl in der Beschaffungslogistik (Tier 2 und Tier 1), in der Produktionslogistik sowie der Distributionslogistik eingesetzt werden oder alternative Antriebe im Transport zwischen allen Stufen verwendet werden. Auf, bzw. zwischen welchen Stufen der Supply Chain die genannten logistischen Prozesse stattfinden, soll in nachfolgender Abbildung mithilfe des linken Kastens verdeutlicht werden. Auf welchen Stufen (Kasten rechts) Beschaffungs- und Lagerprozesse vorhanden sein können, ist jeweils mit der

Zuordnung der einzelnen Symbole, die jeweils unterschiedliche Supply Chain Stufen darstellen, gegeben.

Abbildung 14: Darstellung eines vereinfachten Supply Chain Modells



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IIS

3.3.3 nach Netzwerktypen in der Transportlogistik

Unter logistischen Netzwerken versteht man grundsätzlich „ein geordnetes Durchflusssystem, das aus hierarchisch und geografisch angeordneten, im Hinblick auf ein Leistungsziel komplementären Ressourcenknoten und diese Knoten verbindenden Verkehrs- und Informationswegen („Kanten“) besteht und dem dauerhaft die Aufgabe zufällt, in einem Leistungsverbund Quellen (z. B. Fertigwarenläger von Produktionsstätten) bedarfsgerecht und wirtschaftlich mit Senken (Abnehmern) zu verbinden.“ ((Bretzke, 2015), S. 102)

Es wird dabei also eine Verbindung von unterschiedlichen Akteuren (Lieferanten, Produktionsstätten, Händlern und Konsumenten) beschrieben, wobei unterschiedliche Logistiksegmente auch unterschiedliche Transportmuster aufweisen können. Nach einer Systematisierung von (Schwemmer et al., 2020) werden zehn Logistiksegmente unterschieden:

- ▶ Kurier-, Express- und Paketdienste
- ▶ Allgemeine Stückgutverkehre
- ▶ Spezielle Stückgutverkehre
- ▶ Allgemeiner Ladungsverkehr
- ▶ Spezielle Ladungsverkehre (Tank- und Silotransporte, Schwerguttransporte, spez. Equipment)
- ▶ Massengut
- ▶ Terminal und Warehousinglogistik
- ▶ Kontraktlogistik (Industrielle Kontraktlogistik, Konsumgüterkontraktlogistik)
- ▶ Internationale Spedition (See- und Luftfracht)
- ▶ KMU-Logistik

- ▶ **Kurier-, Express- und Paketdienste** sind charakterisiert durch ein dichtes, flächendeckendes Netzwerk von Depots/Hubs und agieren auf lokaler bis globaler Ebene. Transportiert werden Waren zwischen ca. 1 – 31 kg. In Deutschland sind KEP-Netzwerke durch 50-80 regionale Depots ausgestaltet sowie teilweise weitere lokale Zustellbasen. Die Prozessabwicklung ähnelt der der Stückgut-Netzwerkverkehre und besteht aus einer „regionalen Abholung („Pick-Up“), der Relations-Sortierung in einem Abgangsdepot, einem ein- oder zweistufigen (über ein Hub) „Zwischenumschlag“, einem gebündelten „Hauptlauf“-Transportvorgang für die Überbrückung der Depot-zu-Depot-Distanz, einer touren- und empfangenorientierten Sortierung im Empfangsdepot und der gebündelten regionalen Endauslieferung mit Verteilerfahrzeugen („Delivery“).“ ((Schwemmer et al., 2020) 83ff)
- ▶ Unter **allgemeinen Stückgut-Netzwerkverkehren** fallen Transporte einzeln verpackter, stapelfähiger, trockener Güter, die normalerweise auf einem Ladungsträger, wie einer Palette, befördert werden. (MUCHNA ET AL., 2018, 135; SCHWEMMER ET AL., 2020, 90) Transportketten lassen sich in einen Vor-, Haupt- und Nebenlauf unterteilen, finden also häufig mehrstufig statt (vgl. CLAUSEN U. GEIGER, 2013, 134). Die typische Prozessabwicklung findet, ähnlich der KEP-Netzwerke, in mehr oder weniger fünf Teilschritten statt: „regionalen Abholung („Pick-Up“), Umschlag und Sortierung in einem Abgangsdepot auf das für jede Sendung in Frage kommende Zustelldepot, dem gebündelten Hauptlauf-Transportvorgang in großen Fahrzeugen von Depot zu Depot (manchmal ergänzt um einen zusätzlichen Bündelungsvorgang in einem zentralen oder regionalen Hub), einer touren- und empfangenorientierten Sortierung im Empfangsdepot und der gebündelten regionalen Endauslieferung mit Verteilerfahrzeugen („Delivery“).“ ((Schwemmer et al., 2020), S. 94)
- ▶ **Netzwerkverkehre für spezielle Stückgüter**, also sensible Güter oder solche mit besonderen Anforderungen sowie sperrige Güter, sind durch die Vielfalt unterschiedlicher Produkte sehr inhomogen. Die Transportabwicklung entspricht in etwa der wie von allgemeinen Stückgut- und KEP-Diensten. (vgl. (Schwemmer et al., 2020), S. 96ff)
- ▶ Netzwerke unterschiedlicher **Ladungsverkehre**, also solche, bei denen das Fahrzeug durch eine Ladung komplett ausgelastet ist, werden vorwiegend als Direktverkehre abgewickelt. Dem gegenüber steht der kombinierte Verkehr, der je nach Ausgestaltung des Netzes und abhängig der zu transportierenden Ladung vorteilhaft sein kann. Ladungsverkehre finden vorwiegend im nationalen und internationalen Fernverkehr (> 150km) statt, aber auch auf kürzeren regionalen Routen. Ein Viertel der Ladungsverkehre ist auf gewerbliche und Werks-Ladungsverkehre zurückzuführen. (vgl. (Schwemmer et al., 2020), S. 102ff)
- ▶ Ähnlich abgewickelt werden **Ladungsverkehre mit speziellem Equipment**, Tank- oder Silotransporte, Schwertransporte usw., wobei diese deutlich heterogener ausfallen können. Mit einem Anteil von 50% nehmen Werksverkehre einen hohen Anteil der Ladungsverkehre mit speziellem Equipment ein.
- ▶ **Werksverkehre** werden vorwiegend im Nah- (bis 50km) und Regionalverkehr (bis 150km) mit dem Lkw abgewickelt, wobei ein Branchenfokus auf Handel, verarbeitende Betriebe und die Baustoffindustrie erkennbar ist. (vgl. BAG, 1999, IN: (Clausen & Geiger, 2013), 133) Im Direktverkehr weisen diese Logistiknetzwerke einen hohen Anteil an Leerfahrten auf, wenn Transporte ohne Rückladung stattfinden. (vgl. (Muchna et al., 2018), S. 125)
- ▶ **Massengutlogistik**, für die die Binnenschifffahrt, Schiene, Pipelines und inländische Häfen wichtige Verkehrsträger, bzw. Infrastruktur ist, beinhaltet vorwiegend den Transport von amorphen Schütt- und Flüssiggütern.

Transportmuster innerhalb dieser Transportnetzwerke unterscheiden sich u. a. nach transportiertem Gewicht, Verkehrsträgern und Verkehrsmitteln, ebenso sind Kombinationen üblich. Häufig kommen Kombinationen aus Teil- oder Komplettladungsverkehren und eine anschließende regionale Flächenverteilung, bzw. Transshipmentpoint-Modelle sowohl in nationalen als auch internationalen Zustellungen zum Einsatz. (vgl. (Tripp, 2019), S. 84). Mit zunehmender Größe eines Distributionsnetzes, nimmt ebenfalls die Komplexität zu.

3.3.4 nach Standorttypen

Zusätzlich werden nach einer Typologisierung des Fraunhofer IIS (vgl. (Veres-Homm et al., 2015)) Logistikstandorte innerhalb eines Netzwerkes je nach Versorgungsgebiet und Zweck in fünf Typen unterteilt:

- ▶ **Regionalversorgende Logistikstandorte:** Die Versorgung eines Ballungsraums erfordert eine vergleichsweise kleinräumige Distribution mit Nähe zur jeweiligen Senke (dem Ballungsraum). Der typische Distributionsradius bei kurzstreckigen Sammel- oder Verteiltouren liegt bei ca. 40 km. Wichtigstes Infrastrukturmerkmal ist die Straßen- bzw. Autobahnbindung, da die schnelle Belieferung gerade in Innenstädten nur auf diesem Verkehrsträger gewährleistet ist, d.h. die Straße ist hier der dominierende Verkehrsträger. Besonders zeitkritische und verderbliche Waren werden auf kurzer Strecke transportiert, d.h. dominierende Branchen sind regionale Großhändler, die umliegende Werkstätten oder Handwerker beliefern, Online-Anbieter von zeitkritischen Waren für die Same-Day-Belieferung, Einzelhändler aus dem Lebensmittelbereich, flächendeckende Filialisten aus dem Nonfood-Segment, Pharmagroßhändler, die u. a. lokale Apotheken beliefern und die regionale Ersatzteilversorgung z. B. im Automobilbereich. Umweltwirksame Maßnahmen zielen auf die Reduktion von Lkw-Lieferverkehren in Städten durch den Einsatz von E-Bikes und Lastenräder, die eine Integration von mobilen Logistiklagern oder Mikrodepots in urbanen Räumen voraussetzen.
- ▶ **Zentralversorgende Logistik:** Die Belieferung eines großräumigen Gebiets, das meist mehrere Ballungszentren oder gar ganze Länder umfasst, erfolgt von einem Punkt aus. Die Destinationsregionen können dabei beispielsweise Gesamtdeutschland, aber auch der DACH-Raum oder weitere Teile von Europa sein. Als Verkehrsträger ist die Autobahn üblicherweise am wichtigsten, da sie ein schnelles und zuverlässiges Erreichen des Versorgungsgebietes ermöglicht. Somit ist neben einer zentralen Lage auch eine Anbindung an Hauptverkehrsachsen essenziell. Eine nationale und europäische Distribution erfolgt durch nahezu alle Branchen, wobei besonders der Versand- und Internethandel, Groß- und Einzelhandelsunternehmen im Non-Food-Bereich sowie Industrieunternehmen mit Fertigwaren und/oder Ersatzteilen vertreten sind.
- ▶ **Gateway-Logistikstandorte:** Beschreibt eine gebündelte Anlieferung und anschließende Feinverteilung von den im Ausland, meist in Übersee, produzierten Waren. Ziel ist es, diese Waren auf möglichst effiziente Weise zu importieren, daher werden Standorte hinsichtlich der Güterquellen gewählt. Der Transport erfolgt über Flughäfen oder in Containern über die Seehäfen und anschließende Hinterlandverkehre an einen Lagerstandort, von wo sie über die Straße an die Endkunden verteilt werden. Das Angebot einer möglichst flexiblen und leistungsfähigen Infrastruktur spielt dementsprechend die wichtigste Rolle, v.a. die Anbindung an ein internationales Gateway für Transportströme wie große Frachtflughäfen oder Container-Seehäfen. Falls kein direkter Zugang zu diesen Einrichtungen besteht, bieten mittlerweile zahlreiche Regionen Infrastrukturleistungen in Form des kombinierten Verkehrs an. Dominierende Branchen sind das produzierende Gewerbe sowie Groß- und

Einzelhändler aus dem Technologie-, Elektronik-, Bekleidungs- und Investitionsgüterbereich.

- ▶ **Industrielle Logistikstandorte:** Zur Ver- bzw. Entsorgung eines oder mehrerer Standorte der produzierenden Industrie ist die Nähe zu den Produktionsstandorten von großer Bedeutung, um eine möglichst zuverlässige Anlieferung von Produktionsteilen und Abholung von Fertigwaren zu gewährleisten. In dieser Art von Transportnetzwerk ist eine hohe Servicequalität sehr relevant. Intralogistische Prozesse und Innenausstattung von Standorten sind teilweise produktions- und nutzerspezifische, nach Vorgaben der jeweiligen Industriekunden. Dominante Branchen kommen aus der verarbeitenden Industrie, die ihre Logistik in Eigenregie abwickelt und Logistikdienstleistern im Bereich der industriellen Kontraktlogistik, v.a.: Automobilindustrie, Maschinenbau, Metallindustrie, Chemie- und Pharmaindustrie, Lebensmittelherstellung. In der industriellen Kontraktlogistik greifen Maßnahmen, die eine Standortverlagerung und Nähe zu Unternehmen mit Lieferbeziehungen, bzw. -nähe zu Ressourcen anstreben. Durch die Verkürzung von Distanzen, werden wiederum Emissionen eingespart. Zudem könnte eine zentrale Organisation von Transporten innerhalb eines Unternehmens zu effizienteren Routen und ggf. Transportbündelungen führen, was ebenfalls eine Reduktion von Fahrkilometern und bessere Fahrzeugauslastungen nach sich zieht.
- ▶ **Netzwerk-Logistikstandorte:** Schnitt- und Umschlagsstelle zwischen Nah- und Fernverkehren für die Ver- als auch Entsorgung eines Einzugsgebietes. Wichtigster Aspekt ist in den meisten Transportnetzwerken der reibungslose Zugang zur Autobahn, aber auch die Anbindung an andere Verkehrsträger ist für eine möglichst große Flexibilität der logistischen Prozesse nicht zu vernachlässigen, ebenso wie die Nähe zu einem Ballungsraum als lohnendem Ver- und Entsorgungsgebiet

Merkmale dieser dienen lediglich der ergänzenden Beschreibung von Netzwerken der Nah-, Regional- und Fernverkehre, wobei mehrere unterschiedliche Standorttypen innerhalb der Netzwerke vertreten sein können. Die Standorttypologie als qualitatives Konstrukt ist jedoch nicht quantifizierbar und demnach auch nicht statistisch abbildbar zur Bilanzierung von Maßnahmen. Zudem sind eindeutige Zuordnungen zu einem Netzwerktyp auf der Mikroebene nicht möglich, sodass eine ausschließliche Betrachtung dieser Typologie nur mit einem sehr hohen Grad an Annahmen möglich wäre.

3.3.5 nach Entfernungsklassen in der Transportlogistik

Betrachtet man die Entfernung der Transporte, so lassen sich nach (Clausen & Geiger, 2013), S. 132) der Güternahverkehr und Güterfernverkehr unterscheiden. (Bichler et al., 2017), S. 94f) beschreibt den Güternahverkehr als „die gewerbliche Beförderung von Gütern mit Lastkraftfahrzeugen innerhalb eines Nahbereiches, wie z. B. einer Stadt oder eines Ballungsraumes“ und den Güterfernverkehr als „die gewerbliche Beförderung von Gütern mit Lastkraftfahrzeugen über die Grenzen der Nahzone hinaus oder außerhalb dieser Grenzen“. Nach dem Bundesamt für Güterverkehr gilt der Nahverkehr in einem Radius bis 50 km, Regionalverkehr zwischen 51 bis 150 km und Fernverkehre ab 151 km.

Nahverkehre bis 50 km dienen zu einem Großteil der regionalen Endauslieferung von Gütern auf der letzten Meile zur Versorgung von städtischen oder ländlichen Gebieten oder finden im Vorlauf („Pick-Up“) eines mehrstufigen Transportprozesses statt. Kurier-, Express- und Paketdienste oder allgemeine Stückgut-Netzwerkverkehre transportieren Waren zu einem Empfangsdepot oder gebündelt von einem lokalen Depot zum Endkunden. An regionalversorgenden Logistikstandorten, besonders zur Belieferung von Innenstädten in Ballungsräumen, ermöglicht die Straße als bevorzugter Verkehrsträger eine schnelle

Belieferung. Durch die Integration von mobilen Logistiklagern, bzw. Mikrodepots in urbanen Räumen, kann eine Verteilung via (E-)Lastenrad erfolgen, wodurch Lkw-Transporte reduziert werden können und somit Lärm, Straßenverkehre und Emissionen gesenkt werden. Ein Fahrverbot in Innenstädten würde den Einsatz von Rädern notwendig machen. Durch die Einrichtung städtischer Umschlags-/Verteilzentren können zudem kleinere Fahrzeugklassen eingesetzt werden und Routen optimiert gefahren werden, was zu einer Minimierung der Fahrzeugkilometer und somit ebenfalls der Emissionen führt. Eine Einrichtung von abseitsgelegenen Ladezonen schlägt sich durch effizientere Be-/Entladeprozesse auf die Verkürzung von Lieferzeiten und Entlastung von öffentlichen Räumen aus. In ausgewählten Branchen und Städten, sofern eine ausreichende Infrastruktur gegeben ist, können zudem durch die Nutzung von Wasserwegen Straßenverkehre reduziert werden.

Ebenfalls finden an industriellen Logistikstandorten Werkverkehre im Nahverkehr statt, welche häufig als Direktverkehr mit dem Lkw abgewickelt werden. Maßnahmen, die hier ansetzen, streben durch eine optimale Standortwahl/eine Standortverlagerung und Nähe zu Unternehmen mit Lieferbeziehungen, bzw. Nähe zu Ressourcen an. Durch die Verkürzung von Distanzen, werden wiederum Emissionen eingespart. Zudem könnte eine zentrale Organisation von Transporten innerhalb eines Unternehmens zu effizienteren Routen und ggf. Transportbündelungen führen, was ebenfalls eine Reduktion von Fahrkilometern und bessere Fahrzeugauslastungen nach sich zieht.

Regionalverkehre zwischen 51 und 150 km sind nicht immer eindeutig von Nah- oder Fernverkehren abzugrenzen. Maßnahmen, die sich ausschließlich auf Regionalverkehre beziehen, konnten nicht identifiziert werden. Vielmehr werden häufig Maßnahmen im Nahverkehr (bzw. Fernverkehr) ebenso auf dieser Zwischendistanz eingesetzt, sodass Wirkungsweisen vergleichbar sind.

Für **Fernverkehre ab 151 km** kommen neben Lkw vermehrt Schiff, Bahn oder Flugzeug als Transportmittel im nationalen und internationalen Verkehr zum Einsatz. Das optimale Zusammenspiel unterschiedlicher Verkehrsträger und der entsprechenden Prozesse in der Umschlagsabwicklung führen zu einer Reduktion von Fahrzeugen und Energieeinsparungen durch eine Effizienzsteigerung. Zudem begünstigt eine optimale Verteilung verschiedener Verkehrsträger eine CO₂-Minderung. Eine Schnittstelle zu Regionalverkehren stellt u. a. die stärkere Nutzung des Bahnschienennetzes dar. Mithilfe längerer Züge und alternativen Antrieben für Züge, können Fahrten mit Lkw reduziert werden und somit auch Emissionen. Eine Effizienzsteigerung der ausgewählten Transportmittel kann sich ebenfalls positiv auf den Energieverbrauch auswirken. So lassen sich hier vor allem Maßnahmen zuordnen, die eine optimierte Bauweise oder Dynamik (bspw. Hydrodynamik bei Schiffen) und unterschiedliche Antriebskonzepte für Schiffe und Fahrzeuge beschreiben. Netzwerk- und Gateway-Logistikstandorte stellen wichtige Umschlagsstellen zum Nah- oder Regionalverkehr dar. Importwaren kommen zunächst über Flughäfen oder Seehäfen an und werden anschließend über Hinterlandverkehre zum jeweiligen Lager transportiert und von dort aus letztendlich mit dem Lkw verteilt.

Aufgrund der Verfügbarkeit statistisch geeigneter Daten zur Bilanzierung und abgeleitet aus den Maßnahmen aus AP 1, wurde für die Bilanzierung der Maßnahmen die Zuordnung von Maßnahmen zu Nah-, Regional- und Fernverkehren festgelegt. Eine eindeutige Zuordnung zu nur einem Distanzbereich ist allerdings nur selten möglich.

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Zuordnung der Maßnahmen zu einem oder mehreren Netzwerken, bezogen auf den Entfernungsradius, in welchem ein Einsatz der Maßnahmen am wahrscheinlichsten ist. Der nachfolgend gezeigte Einsatz einer Maßnahme in einem/mehreren Netzwerktypen entspricht teilweise nicht gleichzeitig dem Ort der Wirkung. So reduzieren

beispielsweise ausgewählte Maßnahmen, die im Nahverkehr eingesetzt werden, Transportkilometer im Fernverkehr, z. B. durch die Dezentralisierung von Produktion und Lagerei oder die Verlagerung von Produktionsstandorten, werden bewusst Standorte mit geografischer Nähe zueinander ausgewählt. Dies wird in der Bilanzierungsstruktur berücksichtigt.

Abbildung 15: Zuordnung von Einzelmaßnahmen zu Netzwerken des Nah-, Regional- und Fernverkehrs

Nahverkehr (bis 50 km)	zwischen	Regionalverkehr (51 -150 km)	zwischen	Fernverkehr (über 150 km)
Vans, Leichtbau und Vergrößerung der Ladekapazität				
Transport via E-Bike				
Lastenräder				
Offroad-Ladezonen				
Direkte Auslieferung an den Kunden (Bsp. VAUDE)				
Nutzung von Schiffen in der städtischen Logistik				
Fahrverbot im Innenstadtbereich und Schaffung von Freiflächen für Mikrodepots				
Intelligente Servicestationen				
Nutzung von öffentlichen Verkehrswegen				
Dezentralisierung von Produktion und Lagerhaltung				
3D-printing				
Verlagerung der Produktionsstandorte (Bsp. VAUDE)				
Einbeziehen und Reservieren von optimalen Logistikstandorten in der Stadtplanung				
Mobile Logistiklager				
Einrichtung städtischer Umschlags-/Verteilungszentren				
Nutzung von Schiffen in der städtischen Logistik				
Local Sourcing				
Localisation and nearshoring				
Lieferfahrzeug LNF(Elektro) für Lebensmittel				
E-Lkws für Nachtlogistik				
				Verlagerung Straße-Schiene
				Gigaliner
				Längere Züge
				Alternative Antriebe für Züge (Batterieelektrisch oder Brennstoffzelle)
				Schiene (Ausbau Elektro)
				Schiff (Skysail)
				Slow Steaming-Wirkung auf gesamte Flotte
				Slow Steaming-Wirkung auf einzelne Schiffe und Kosten
				Flugzeug, optimierte Triebwerke
				Optimierte Bauteile im Flugzeug
				Optimierte Hydrodynamik bei Schiffen
				LNG Schiff
				Brennstoffzelle Schiff
				PtL Flugzeug

Quelle: Eigene Darstellung

Maßnahmen, die in allen Netzwerken gleichermaßen denkbar sind, beziehen sich vor allem auf alternative Antriebe, bzw. Effizienzsteigerung von Lkw, optimierte Prozesse, Einführung von Nutzungsgebühren, Routenoptimierungen, Modal Split oder Kooperationsmodellen. Nachfolgende Maßnahmen in Abbildung 16 könnten bspw. in allen Netzwerken eingesetzt werden:

Abbildung 16: Zuordnung von Maßnahmen, die allen Netzwerktypen des Nah-, Regional- und Fernverkehr zuordenbar sind

Nahverkehr (bis 50 km)	zwischen	Regionalverkehr (51 -150 km)	zwischen	Fernverkehr (über 150 km)
		Anpassung Lkw in Mehrkammer-Fahrzeuge		
		Lkw-Erweiterung Ladekapazität		
		Seitenverkleidung Lkw-Auflieger		
		Abgeschrägtes Heck und Winglets am Lkw-Auflieger		
		Lkw Flottenerneuerung (EURO 6)		
		Verbot von Fahrzeugen mit hohen Emissionswerten und Ersetzen durch "grünere" Alternativen		
		Lkw Flottenerneuerung (Hybrid)		
		Lkw Flottenerneuerung (Elektro)		
		Lkw Flottenerneuerung (OH)		
		Brennstoffzellen Lkw		
		Lieferfahrzeug LNF(Elektro) für Lebensmittel		
		E-Lkws für Nachtlogistik		
		Lieferung außerhalb von Stoßzeiten		
		Optimierung KV Straße-Schiene-Schiff		
		Multimodal optimisation		
		zentrale Organisation von Transporten im Unternehmen (Bsp. Bosch)		
		Intelligente Telematik		
		Synchromodality		
		Crowd-shipping		
		Open warehouses and transport networks		
		Kooperationen der Unternehmen, Transport-Bündelung		
		intelligentes Ladungssystem Fleetboard		
		Internalisierung der Schadstoff-/Umweltwirkung		
		Einführung von Gebühren für Straßennutzung, Bahntrassen und Häfen		
		Reduzierung der Sonder-/Eillieferungen (z.B. Flugzeug vs. Schiff bzw. Sprinter vs. FTL)		
		Reduzierung physischer Gütermengen		
		Neue Verpackungssysteme		
		Effiziente Verpackung und flexible Anpassung an Lieferfahrzeuge		
		Klimaneutrale Versandoptionen (Green Shipping, Clean Cargo)		
		Häfen - Implementierung von Landstrom		
		Häfen - Reduktionspotenzial für Häfen aus kombinierten Maßnahmen		
		Ersetzen von aktiven durch passive Kühlsysteme		
		Regulierung von Frachtrouten (durch Digitalisierung)		
		Routenoptimierung in Echtzeit		
		Routenplaner		
		Verkehrsleitsysteme		
		Auswahl der Dienstleister nach CO2 Performance		
		Nachhaltige Lieferantenauswahl		
		Öffentliche Darlegung von Liefer- und Serviceplänen (DSPs)		
		Block Chain in der Logistik		
		Längere Transportzeiten ermöglichen		

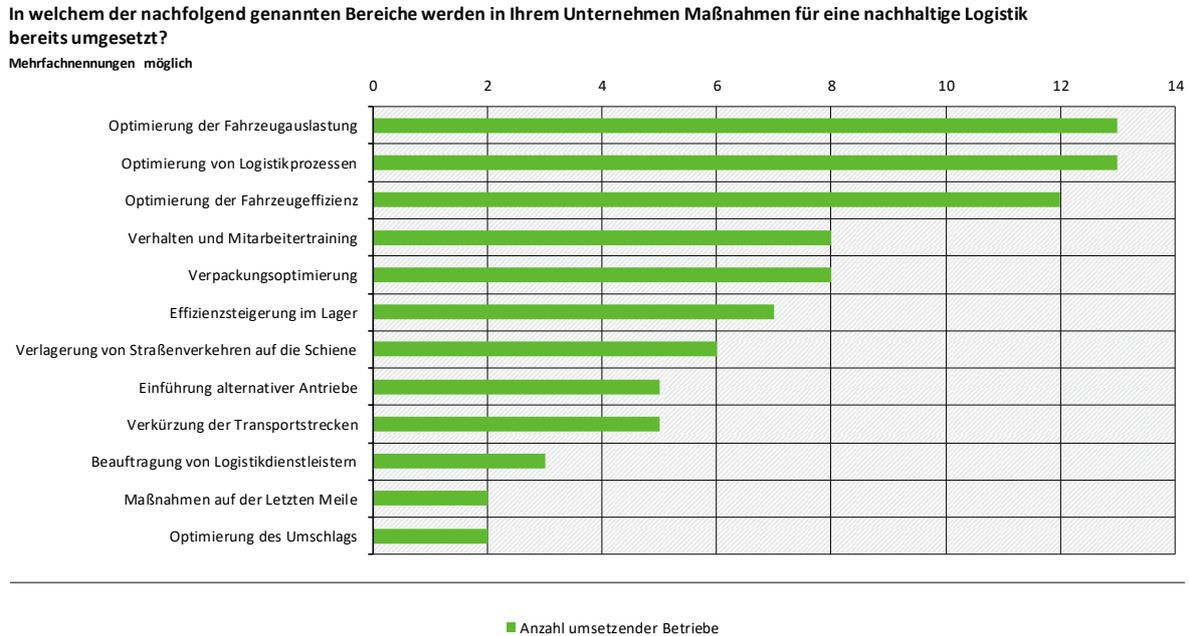
Quelle: Eigene Darstellung

3.4 Ergebnisse der Befragung zum Status quo und der weiteren Entwicklung nachhaltiger Logistikkonzepte

Neben der Relevanzeinschätzung von Zielen nachhaltiger Logistik (siehe Kapitel 2.3) wurde bei den Teilnehmenden der Befragung erhoben, in welchen Bereichen (bezugnehmend auf die Ebenenzuordnung in Kapitel 3.2) bereits Maßnahmen für eine nachhaltige Logistik eingesetzt werden. Die Ergebnisse in Abbildung 17 zeigen, dass in den Bereichen „Optimierung der Fahrzeugauslastung“, „Optimierung von Logistikprozessen“ und „Optimierung der

Fahrzeugeffizienz“ von den antwortenden Unternehmen bereits am häufigsten Maßnahmen umgesetzt werden.

Abbildung 17: Einschätzung der befragten Unternehmen, in welchen Bereichen bereits Maßnahmen für eine nachhaltige Logistik umgesetzt werden



n=84

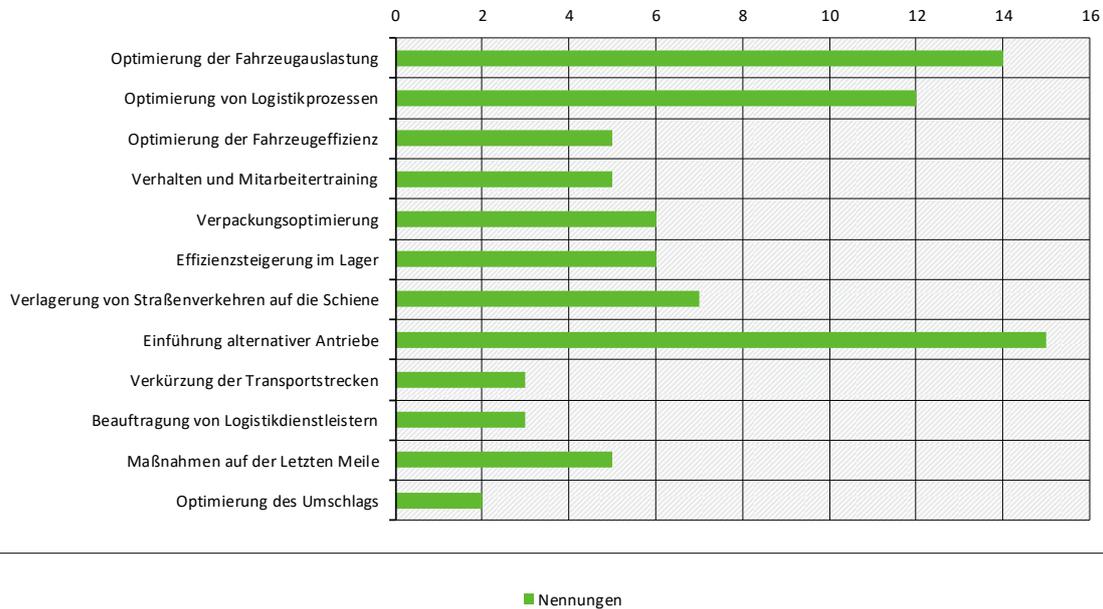
Quelle: Unternehmensbefragung

Im Anschluss wurde abgefragt, welche drei Bereiche zukünftig die höchste Relevanz für das Unternehmen haben (siehe Abbildung 18). Hier zeigt sich, dass die Bereiche „Optimierung der Fahrzeugauslastung“ und „Optimierung von Logistikprozessen“ hochrelevant bleiben. Allerdings wird die „Einführung alternativer Antriebe“ als Bereich mit höchster Relevanz von den antwortenden Unternehmen genannt. Der Zeithorizont für die Einführung alternativer Antriebe wird von den meisten Befragten dabei als mittel- bis langfristig eingeschätzt (2-5 Jahre oder mehr als 5 Jahre).

Abbildung 18: Einschätzung der Unternehmen, welche Bereiche aus ihrer Sicht zukünftig die höchste Relevanz für ihr Unternehmen haben

Bitte wählen Sie die drei Bereiche aus, die Ihrer Meinung nach zukünftig die höchste Relevanz für Ihr Unternehmen haben.

Mehrfachnennungen möglich



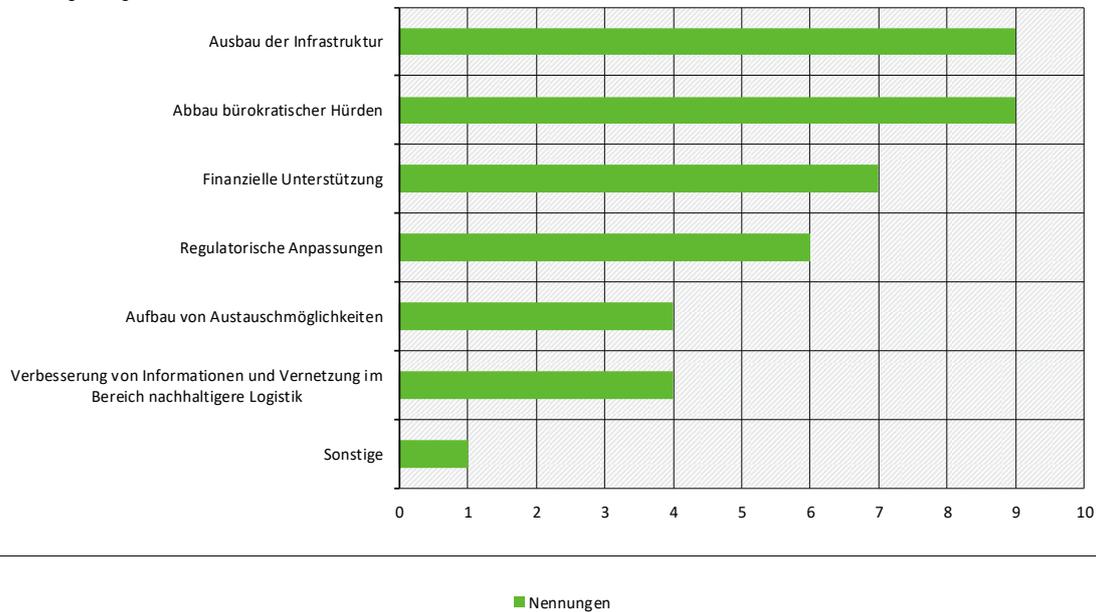
n=84

Quelle: Unternehmensbefragung

In der Befragung wurden weiterhin Wirkpotentiale der Politik adressiert. Konkret wurde nach wichtigen Stellhebeln der Politik zur Unterstützung der Einführung nachhaltiger Logistikkonzepte in den Unternehmen gefragt (Abbildung 19). Der Ausbau der Infrastruktur (z. B. Lademöglichkeiten und Werkstätten für alternative Antriebe) und der Abbau bürokratischer Hürden (z. B. schnellere Genehmigungsverfahren beim Aufbau von Strukturen für die Kraftstoff- und Energieversorgung, oder die Vereinfachung von Fördermöglichkeiten) werden von den antwortenden Unternehmen als wichtigste Stellhebel der Politik gesehen. Auch niedrigschwellige Stellhebel wie der Aufbau von Austauschmöglichkeiten und die Verbesserung von Information und Vernetzung im Bereich der nachhaltigen Logistik werden als wichtig eingeschätzt. Hier werden konkret z. B. neutrale Dialog-Plattformen für Best Practice-/Erfahrungsaustausch sowie die Unterstützung regionaler Lösungsansätze durch Clusterbildung und Gedankenaustausch genannt.

Abbildung 19: Einschätzung der Unternehmen, welche wichtigen Stellhebel der Politik zur Unterstützung der Einführung nachhaltiger Logistikkonzepte sie in ihrem Unternehmen sehen

Wo sehen Sie wichtige Stellhebel der Politik zur Unterstützung der Einführung nachhaltiger Logistikkonzepte in Ihrem Unternehmen?
 Mehrfachnennungen möglich



n=40

Quelle: Unternehmensbefragung

3.5 Zwischenfazit qualitative Untersuchung

In der Gesamtschau ist Folgendes festzustellen:

- ▶ Zusammengefasst kann beobachtet werden, dass sich Maßnahmen im Bereich Beschaffung vor allem auf die gezielte Auswahl von Lieferanten abhängig von deren CO₂-Performance und deren Standortnähe konzentrieren.
- ▶ Der Großteil identifizierter Maßnahmen kann dem Bereich Transport zugeordnet werden, wobei besonders Maßnahmen für Straßenverkehre stark vertreten sind. Zudem werden Potenziale in der Organisationszentralisierung von Transporten und der Internalisierung von Umweltwirkungen der Fahrzeuge zur Berücksichtigung volkswirtschaftlicher Kosten eines Transportes gesehen. Konzepte zur Steigerung der Fahrzeugeffizienz und alternative Antriebe sind über alle Verkehrsträger hinweg vertreten.
- ▶ Maßnahmen aus dem Bereich Verpackung haben vor allem Effekte auf Transportgewicht und Fahrzeugtypen.
- ▶ Ein weiterer Bereich ist die Lagerlogistik, in der Umweltwirkungen durch Effizienzsteigerung und Energieeinsparungen abgeleitet werden können.
- ▶ Die Zuordnung einzelner Supply-Chain-Prozesse erlaubt die Identifizierung von (teils messbaren) Zwischengrößen für den Transport, die Lagerlogistik, Beschaffungsprozesse und Verpackungen. Diese Zwischengrößen wurden für die Entwicklung einer Bilanzierungsstruktur bestmöglich berücksichtigt, was jedoch nicht immer vollumfänglich

möglich war. Herausforderungen ergeben sich durch Unterschiede in Aktualität, Datenbezug und Erhebungsmethoden verfügbarer Statistiken.

- ▶ Aussagen zum Grad der Umweltwirkungen und über das Gesamtpotenzial sind aus der Literatur nicht immer möglich, da diese aus teilweise rein qualitativen Beschreibungen von Effekten oder Daten zu Einzelfallbeispielen nur bedingt ableitbar sind.
- ▶ Aufgrund der Verfügbarkeit statistisch geeigneter Daten zur Bilanzierung wurde für die Bilanzierung der Maßnahmen die Zuordnung von Maßnahmen zu Nah-, Regional- und Fernverkehren vorgenommen. Eine eindeutige Zuordnung zu nur einem Distanzbereich ist allerdings nur selten möglich. Weiterhin gibt es Maßnahmen, die in allen Netzwerktypen des Nah-, Regional- und Fernverkehrs eingesetzt werden können (z. B. optimierte Prozesse, Einführung von Nutzungsgebühren oder Routenoptimierungen). Regionalverkehre zwischen 51 und 150 km sind nicht immer eindeutig von Nah- oder Fernverkehren abzugrenzen. Maßnahmen, die sich ausschließlich auf Regionalverkehre beziehen, konnten nicht identifiziert werden.
- ▶ Die Standorttypologie als qualitatives Konstrukt ist nicht quantifizierbar und demnach nicht statistisch abbildbar zur Bilanzierung von Maßnahmen. Zudem sind eindeutige Zuordnungen zu einem Netzwerktyp auf der Mikroebene nicht möglich, sodass eine ausschließliche Betrachtung dieser Typologie nur mit einem sehr hohen Grad an Annahmen möglich wäre. Der ursprüngliche Ansatz der ausschließlichen Definition von Netzwerken über diese Standorttypen wurde daher im Laufe des Projekts verworfen.
- ▶ Umweltorientierte Logistikkonzepte und Maßnahmen werden in der verfügbaren Literatur häufig in Form von Fallstudien analysiert, ohne die Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle zu untersuchen oder die Ergebnisse in eine systemische Betrachtung einzubetten. Eine Reihe von Maßnahmen kann mangels Datengrundlage daher nicht quantifiziert werden.
- ▶ Potenziale, die sich aus Beschaffungsprozessen ergeben, sind nicht direkt quantifizierbar. Die Höhe der indirekten Auswirkung auf Transport- und Lagerprozesse kann nur durch Annahmen und Experteneinschätzungen qualitativ beschrieben werden. Mit Blick auf die Verabschiedung des Lieferkettengesetzes und der ESG-Reporting-Pflicht der EU fällt dem Bereich nachhaltige Beschaffungsprozesse aber zunehmend mehr Bedeutung zu.
- ▶ Bei vielen der identifizierten Maßnahmen herrscht eine hohe Innovationsdynamik, gerade bei digitalisierten bzw. softwaregestützten Lösungen. Daher ist in regelmäßigen Abständen eine erneute Recherche nach neuen Konzepten und eine Aktualisierung der bekannten Maßnahmen erforderlich, um den aktuellen Stand der Technik und der Umsetzung zu erfassen.
- ▶ In den Bereichen *Optimierung der Fahrzeugauslastung*, *Optimierung von Logistikprozessen* und *Optimierung der Fahrzeugeffizienz* werden von den befragten Unternehmen bereits am häufigsten Maßnahmen umgesetzt. Zukünftig die höchste Relevanz wird bei der Einführung *alternativer Antriebe* gesehen.
- ▶ Der Ausbau der Infrastruktur und der Abbau bürokratischer Hürden werden von den befragten Unternehmen als wichtigste Stellhebel der Politik gesehen. Aber auch niedrigschwellige Stellhebel wie der Aufbau von Austauschmöglichkeiten und die Verbesserung von Information und Vernetzung im Bereich der nachhaltigen Logistik werden als wichtig eingeschätzt.

- ▶ Insgesamt war die Bereitschaft der Unternehmen zur Teilnahme an einer umfassenden Befragung zu umweltorientierten Logistikkonzepten sehr verhalten. Bei gleichzeitig hoher Differenzierung der Antwortmöglichkeiten sind die Befragungsergebnisse zwar indikativ, aber nicht quantitativ belastbar. Ein erneuter Einbezug von Unternehmen sollte unter geänderten Rahmenbedingungen stattfinden, z. B. Befragungen spezifisch zu einem Maßnahmenbereich, oder über Workshop-/Austauschformate.
- ▶ Um den Anteil von elektrischen Nutzfahrzeugen in der Logistik weiter zu steigern sind Nutzervorteile für Unternehmen notwendig. Hier ist die geräuscharme Nachtlogistik ein vielversprechender Ansatz. Die Einhaltung der gesetzlichen Richtwerte ist technologisch, je nach Gebietsausweisung, bereits heute umsetzbar. Derzeit fehlt den zuständigen Genehmigungsbehörden (u. a. Immissionsschutzbehörden, Baubehörden) in den Kommunen jedoch noch verlässliches Wissen über die emittierten Lärmemissionen bei der Anlieferung mit alternativen Antrieben, um Betriebszeiten rechtssicher auszuweiten.
- ▶ Es wird daher kurzfristig empfohlen den Genehmigungsbehörden auf kommunaler Ebene die grundsätzliche Beurteilung von Geräuschen bei der geräuscharmen Nachtlogistik für unterschiedliche Anliefersituationen durch schallgutachterliche Messungen Hilfestellung zu geben. Mittelfristig ist die Etablierung eines Zertifikats „Leise Logistik“ für Fahrzeuge, Prozesse, Maschinen und Geräte nach Vorbild des niederländischen Piek-Zertifikats zu verfolgen. So können Unternehmen einfacher und gezielter Nutzervorteile beim Einsatz von elektrischen Nutzfahrzeugen gewährt werden.

4 Methodik zur Wirkungs- und Potentialabschätzung nachhaltiger Handlungsoptionen der Logistik

Auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche wurde eine Vielzahl möglicher Bausteine nachhaltiger Logistikkonzepte identifiziert (siehe Kap. 3). Für eine Auswahl dieser Bausteine werden im nachfolgenden Kap. 5 deren Wirkungen auf die THG-Emissionen und ausgewählte Luftschadstoffemissionen quantifiziert. Im Sinne der begrifflichen Einfachheit werden diese Bausteine nachfolgend schlicht „Maßnahmen“ genannt, auch wenn hier eher der Zielzustand und nicht der Weg zur Umsetzung im Fokus steht. Dieses Kapitel beschreibt die methodischen Grundlagen der Quantifizierung und Potentialabschätzung.

Um eine Vergleichbarkeit der betrachteten Maßnahmen zu gewährleisten, ist eine einheitliche Bilanzierungsstruktur festzulegen. Allgemein wird die Wirkung einer Maßnahme als Differenz zwischen einem System mit Implementierung der jeweiligen Maßnahme und einem Referenzsystem ohne Implementierung der Maßnahme definiert. Für beide Systeme gelten dieselben räumlichen und zeitlichen Bilanzgrenzen.

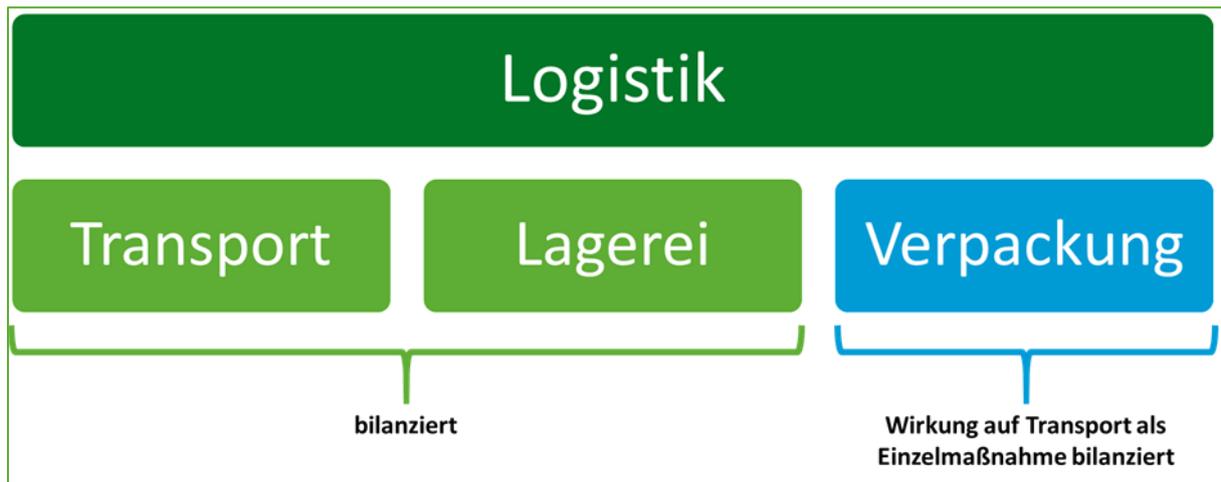
4.1 Untergliederung der Logistikbereiche für die Wirkungsabschätzung

Um dem unterschiedlichen Charakter der verschiedenen Logistikbereiche (vgl. Abschnitt 3.3) Rechnung zu tragen, ist für die Wirkungsquantifizierung eine differenzierte Abbildung dieser Bereiche und der dort ansetzenden Maßnahmen erforderlich. Das Bilanzierungsmodell ist daher auf höchster Ebene in die Bereiche Verpackung, Transport und Lagerei gegliedert, vergleiche Abbildung 20 und Abschnitt 3.3. Die weitergehende Differenzierung innerhalb der Logistikbereiche orientiert sich primär an den verfügbaren Statistiken und etablierten Modellen. Die Datenverfügbarkeit ist dabei zumeist determinierend für den erreichbaren Detaillierungsgrad.

Potenziale, die sich aus Beschaffungsprozessen ergeben, sind nicht direkt quantifizierbar. Eine nachhaltigkeitsorientierte Lieferantenauswahl, bzw. die Auswahl von Dienstleistern nach CO₂-Performance oder die stärkere Berücksichtigung geografisch naher Partner, haben jedoch direkt Auswirkungen auf Transportkilometer, effiziente Transporte und den Einsatz alternativer Antriebe bei den ausgewählten Partnern sowie den effizienten Betrieb von Lagerflächen und Bau nachhaltiger Logistikimmobilien. Mit Blick auf die Verabschiedung des Lieferkettengesetzes und der ESG-Reporting-Pflicht⁸ der EU kommt dem Bereich nachhaltiger Beschaffungsprozesse zunehmend Bedeutung zu.

⁸ ESG steht für Environmental, Social und Governance, meint also die Aktivitäten eines Unternehmens bezüglich umweltrelevanter und sozialer Aspekte sowie hinsichtlich guter Unternehmensführung.

Abbildung 20: Untergliederung der Logistik – Bereiche



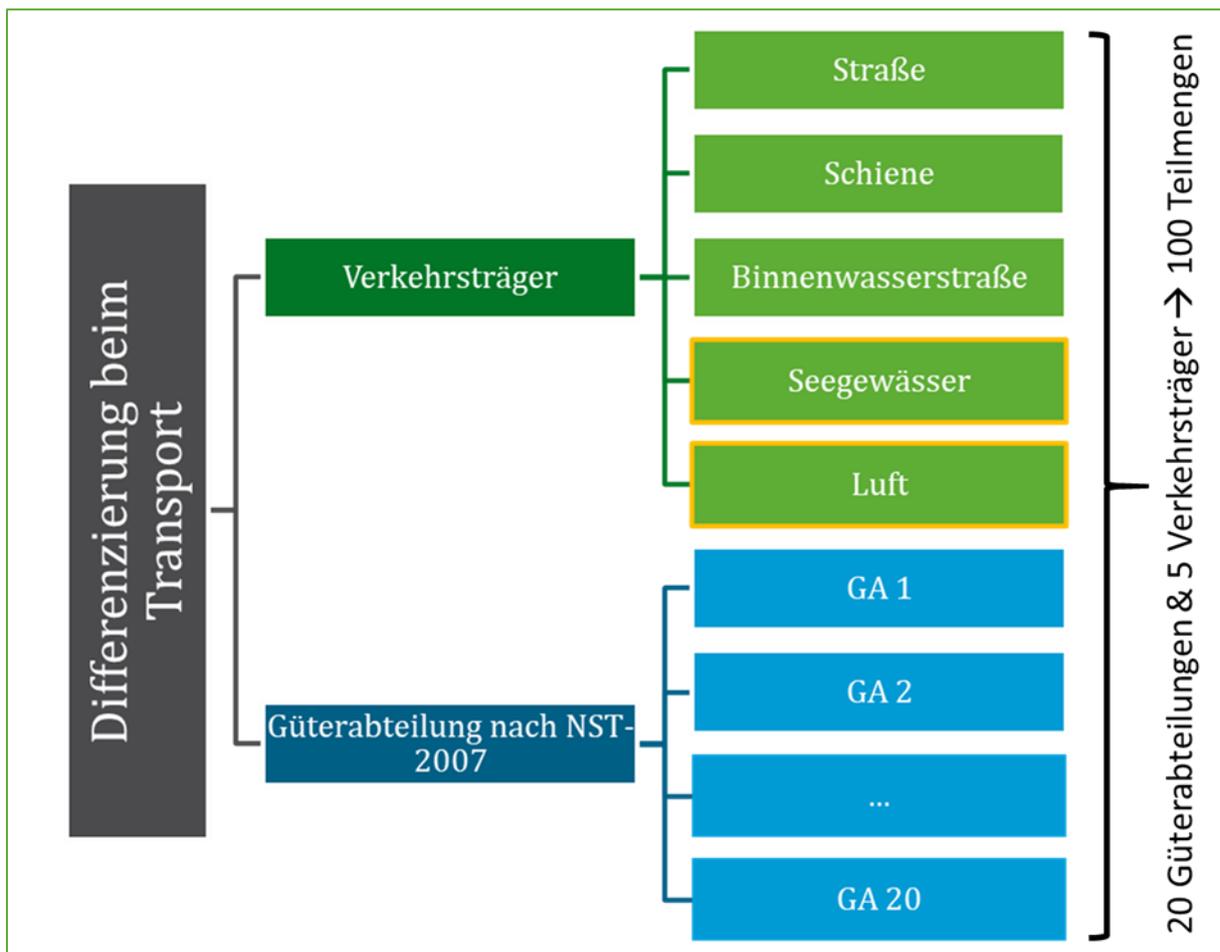
Quelle: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkungen: Grüne Bereiche werden bilanziert. Blauer Bereich wird im Rahmen einer Maßnahme berücksichtigt.

Transport

Der Bereich Transport bildet den Schwerpunkt der Wirkungsquantifizierung. Er wird wiederum untergliedert in die Verkehrsträger Straße, Schiene, Wasserstraße sowie Seegewässer und Luft. Die meisten betrachteten Maßnahmen wirken auf einzelne Verkehrsträger. Es ist aber auch die Quantifizierung von Verlagerungswirkungen zwischen den Verkehrsträgern möglich.

Bei allen fünf Verkehrsträgern wird eine Differenzierung der Verkehrsmengen und Emissionen nach Güterabteilungen vorgenommen. Insgesamt wird zwischen 20 Güterabteilungen unterschieden (nach NST-2007 Ebene 1), siehe Anhang A1. Hierdurch kann berücksichtigt werden, dass einige Maßnahmen nur auf spezifische Güterabteilungen wirken. So ist z. B. eine Reduktion der Retouren nur relevant für Güterabteilung 15 (Post und Pakete). Abbildung 21 zeigt die gewählte Untergliederung des Bereichs Transport.

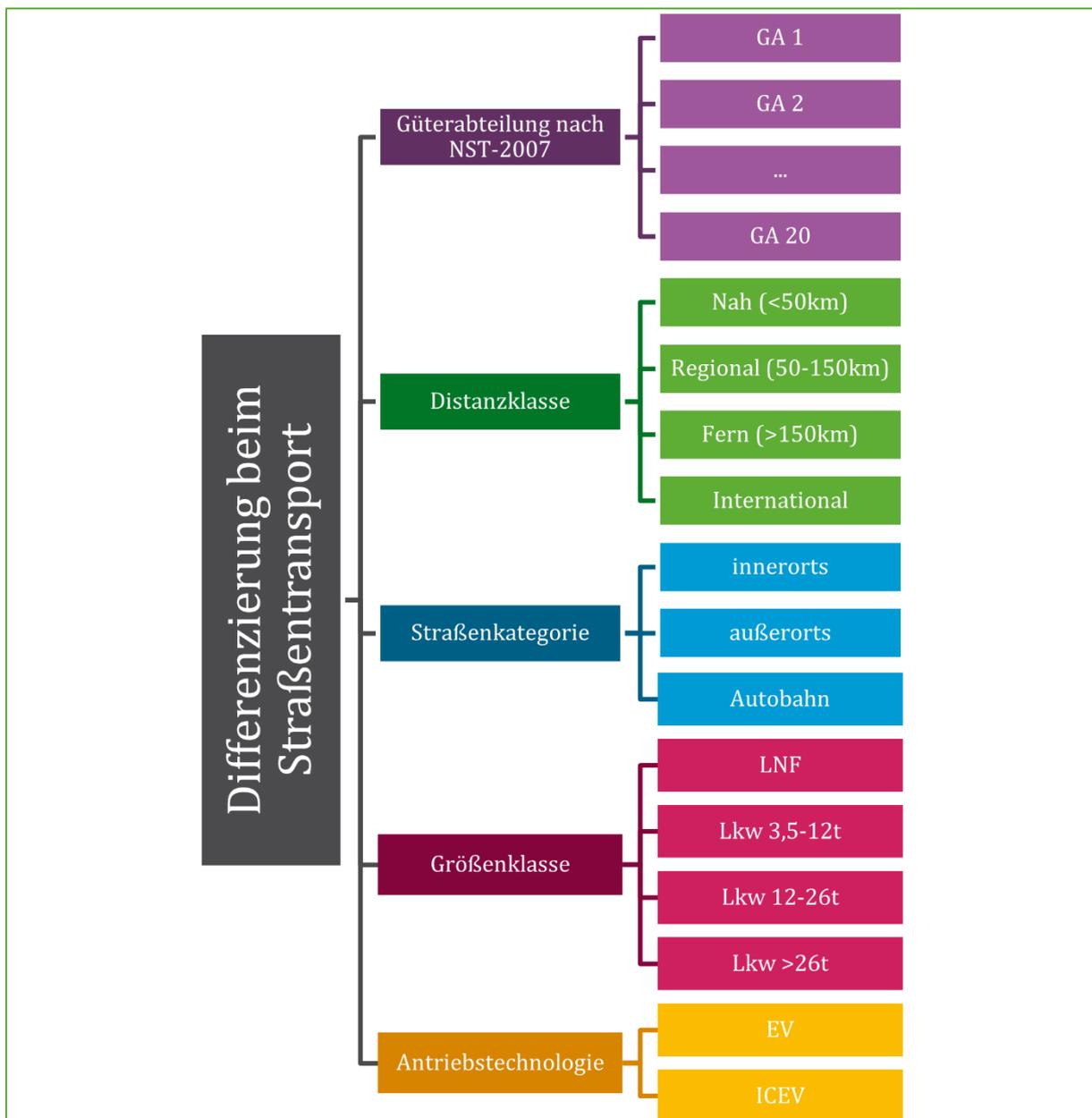
Abbildung 21: Untergliederung des Transports nach Verkehrsträger und Güterabteilung



Quelle: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkungen: Ocker umrahmte Verkehrsträger werden territorial anders bilanziert.

Da der Transport auf der Straße einen hohen Anteil an den Gesamtemissionen des Transports hat und hier detaillierte Daten gegeben sind, wird dieser Bereich für die Quantifizierung weiter ausdifferenziert. Neben den Güterabteilungen wird der Straßenverkehr auch nach Distanzklassen, Straßenkategorie, Größenklasse und Antriebstechnologie der Fahrzeuge untergliedert (Abbildung 22). Auf diese Weise kann den begrenzten Einsatzfeldern einzelner Maßnahmen bei der Hochrechnung der Wirkpotentiale Rechnung getragen werden. Zudem ermöglicht dies die Identifikation von Bereichen mit hohen Emissionen, die bei Umsetzung geeigneter Maßnahmen hohe absolute Reduktionspotenziale aufweisen. So kommt der Ersatz von Lkw durch Lastenräder beispielsweise nur bei geringen Distanzen in Betracht. Der Straßenverkehr wird durch die gewählte Differenzierung in insg. 1.920 Teilmengen eingeteilt.

Abbildung 22: Untergliederung des Straßentransports



Quelle: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkungen: EV – Elektrisches Fahrzeug; ICEV – Fahrzeug mit Verbrennungskraftmaschine.

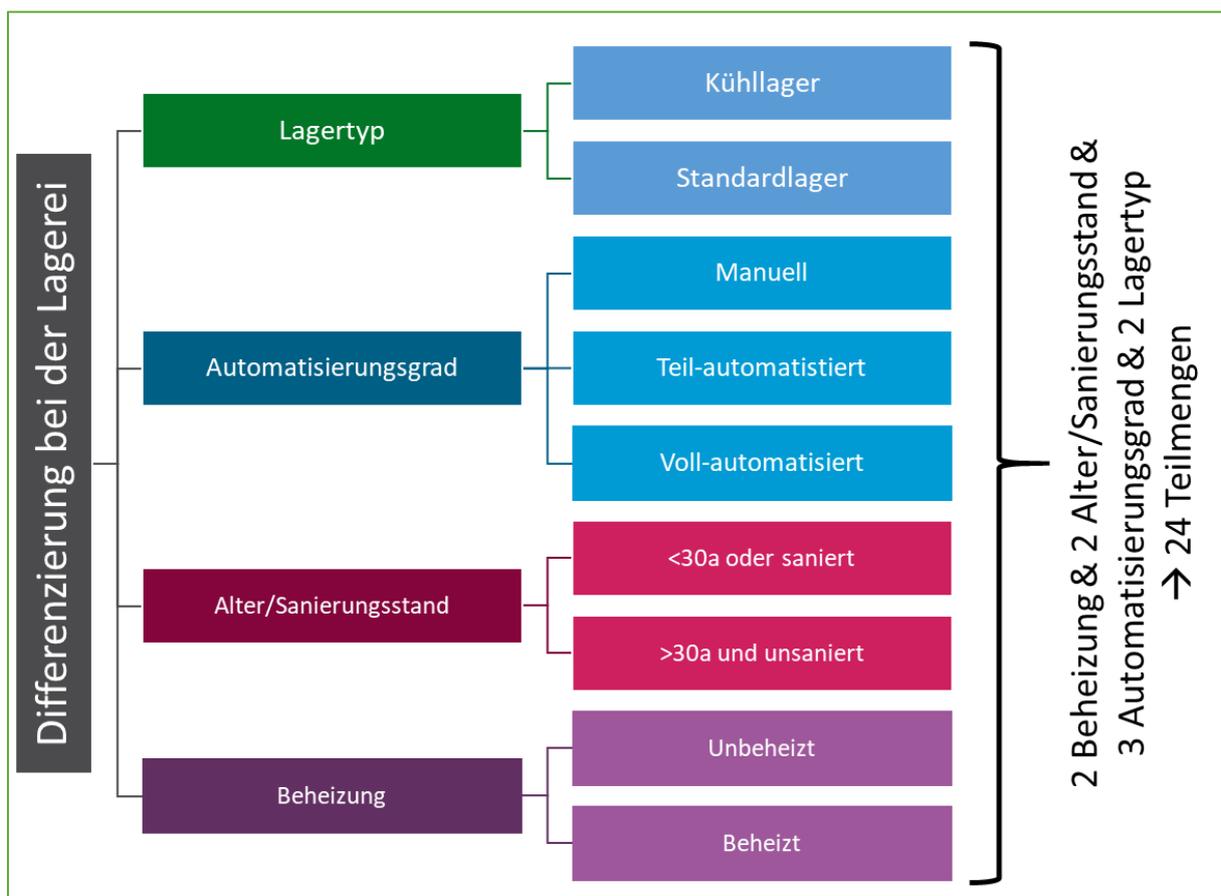
Lagerei

Im Bereich Lagerei wird unterschieden nach Lagertyp, Alter/Sanierungsstand, Nutzenergie und Beheizung. Grob kann man Lager in die Typen Kühllager und Standardlager sowie nach Automatisierungsgrad (manuelle, teilautomatisierte und vollautomatisierte Lager) unterteilen. Zudem sind den Statistiken grobe Aussagen über das Alter bzw. den Sanierungsstand der Lagergebäude zu entnehmen. Vereinfacht werden hier Gebäude älter als 30 Jahre, die unsaniert sind, und Gebäude, die jünger als 30 Jahre oder saniert sind, unterschieden. Für Lager mit den Differenzierungen nach Typ, Art und Alter/Sanierungsstand werden die folgenden Nutzenergien angegeben:

- ▶ Heizung + Warmwasser
- ▶ Beleuchtung
- ▶ Lüftung inkl. Be-/Entfeuchtung
- ▶ Kühlung inkl. Hilfsenergie
- ▶ Stapler/mechanische Arbeit

Abbildung 23 fasst die gewählte Differenzierung im Bereich Lagerei zusammen. Die Lagerei wird somit in 24 Teilmengen eingeteilt.

Abbildung 23: Untergliederung des Bereichs Lagerei



Quelle: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkungen: Bei Kühllagern sind auch Gefrierlager enthalten.

Für die beheizten Lager werden je nach Alter/Sanierungsstand unterschiedliche Anteile von Wärmeerzeugern angenommen. Es werden Ölheizungen, Ölheizungen – Brennwert, Gasheizungen, Gasheizungen – Brennwert, direkte Stromheizung, Wärmepumpen, Fernwärme, Solarthermie und Holzkessel berücksichtigt.

Auf Grundlage der gewählten Untergliederung kann bspw. untersucht werden, welche Wirkung eine Automatisierung von Lagern auf die Emissionen hat. Des Weiteren kann das Potential einer Umstellung der Beheizung auf Wärmepumpen oder allgemein einer Sanierung der Gebäudehülle abgeschätzt werden. Es liegen allerdings keine Informationen über den Anteil der Lagernutzung durch einzelne Güterabteilungen vor, so dass güterspezifische Informationen nicht direkt in die Abschätzung von Wirkpotentialen im Bereich Lagerei eingehen können.

Verpackung

Bei Transportverpackungen ist eine große Bandbreite unterschiedlicher Konzepte im Einsatz, deren jeweilige Anwendbarkeit eng mit der genauen Beschaffenheit der transportierten Güter zusammenhängt. Die Wahl der Verpackungsart beeinflusst die zu transportierenden Massen und Volumina und hat daher mittelbar auch Auswirkungen auf den Energieverbrauch, die Fahrzeugauslastung und somit die transportbedingten Emissionen. Das hieraus resultierende Einsparpotential wird im Rahmen einer Maßnahme quantifiziert. Eine Berücksichtigung der Umweltwirkungen bei der Herstellung bzw. Entsorgung von Verpackungsmaterial konnte im Rahmen dieses Vorhabens hingegen nicht geleistet werden.

4.2 Bilanzraum und zeitlicher Bezug

Bei der Wirkungsquantifizierung der Maßnahmen soll auf das Betrachtungsjahr 2030 fokussiert werden. Bei entsprechendem Ambitionsgrad besteht eine realistische Aussicht, nachhaltige Logistikkonzepte bis zu diesem Jahr zumindest in Teilen einzuführen. Zudem stellt dieses Jahr eine wichtige Wegmarke bei den nationalen Klimaschutzzielen dar. Die im Trend ohne zusätzliche Maßnahmen zu erwartenden Randbedingungen im Jahr 2030 (beispielsweise Verkehrsmengen oder Emissionsfaktoren) bilden sowohl die Grundlage für die Abschätzung der spezifischen Maßnahmenwirkungen als auch für die Hochrechnung der jeweiligen deutschlandweiten Wirkpotentiale.

Abbildung 24 zeigt die gewählten Bilanzgrenzen für den Transport. Der Gütertransport auf Straße, Schiene und Binnenwasserwegen wird nach dem Territorialprinzip bilanziert. Das heißt, dass Verkehrsmengen, direkte Emissionen und Energieverbräuche innerhalb der deutschen Grenzen betrachtet werden. Demnach wird z. B. bei einem Transport von Deutschland nach Österreich nur der Anteil der Fahrstrecke bilanziert, der auf deutschem Gebiet erfolgt. Neben den direkten Emissionen (Tank-To-Wheel: TTW) werden auch die Emissionen, die bei der Energiebereitstellung entstehen (Well-To-Tank: WTT), betrachtet. Die WTT-Emissionen können zwar auch im Ausland entstehen, aber sie werden im Rahmen der Analyse hinzugerechnet, da sie unmittelbar auf den Verbrauch in Deutschland zurückzuführen sind. Die Vorkettenemissionen sind insb. bei den THG-Emissionen relevant. Zwar werden auch die Vorkettenemissionen der Schadstoffe ermittelt, jedoch ist hier der Emissionsort von Relevanz, sodass bei den Schadstoffemissionen die Vorkette nur eine untergeordnete Rolle spielen. Emissionen für die Infrastruktur- und Fahrzeugbereitstellung⁹ bleiben hier unberücksichtigt. Nichtsdestoweniger sind die bilanzierten Emissionen richtungssicher, da beide Komponenten nur einen geringen Anteil an den Gesamtemissionen innehaben, (vgl. Allekotte et al. 2020: „Ökologische Bewertung von Verkehrsarten“). Lediglich bei technologischen Vergleichen von Antrieben (z. B. batterieelektrische ggü. Verbrennungsmotorische Fahrzeuge) sind die Emissionen der Fahrzeugbereitstellung nicht vernachlässigbar.

⁹ Emissionen für die Fahrzeugherstellung, -instandhaltung und -entsorgung.

Abbildung 24: Bilanzgrenzen des Transports



Quelle: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkungen: Graue Bereiche werden nicht berücksichtigt. *Auf deutschem Boden werden der Straßen-, Binnenschiff- und Bahnverkehr bilanziert. Seeschifffahrt und Flugverkehr weichen von diesem Prinzip ab, siehe Erläuterung im Text. **WTT können teilweise auch im Ausland entstehen. Umrahmte Bereiche werden nicht berücksichtigt.

Ergänzend zu den drei genannten Verkehrsträgern werden die Seeschifffahrt und der Flugverkehr bilanziert, wobei hier nicht das Territorialprinzip angewendet wird. Hintergrund ist, dass insbesondere Seetransporte aber auch internationale Flüge fast ausschließlich abseits des deutschen Territoriums erfolgen und somit bei Verwendung des Inlandsprinzips praktisch nicht bilanziert werden können. Um dennoch die für die Gesamtemissionen des Transports sehr relevanten Emissionen beider Verkehrsträger zu berücksichtigen, wird ein abweichendes Bilanzierungsprinzip verwendet. Beim Flugverkehr werden Flüge mit Start in Deutschland bis zur ersten Zwischenlandung komplett bilanziert. Internationale Flüge mit Landung in Deutschland bleiben unberücksichtigt. Bei der Seeschifffahrt werden die Emissionen, die beim Import und Export entstehen, jeweils zur Hälfte berücksichtigt. Aufgrund der unterschiedlichen Bilanzierungsmethoden ist daher ein Vergleich der Seeschifffahrt und des Flugverkehrs mit den anderen Verkehrsträgern sowie der Lager nur begrenzt sinnvoll.

Im Bereich Lagerei wird lediglich der Betrieb (TTW und WTT) der Lager bilanziert. Eine Bilanzierung des Aufwands für die Errichtung der Lager wäre zwar wünschenswert, ist im Rahmen dieses Projekts aufgrund der fehlenden Datenverfügbarkeit aber nicht umsetzbar.

4.3 Vorgehen zur Wirkungsquantifizierung

4.3.1 Grundlegende Wirkzusammenhänge

Wirkmechanismen von Maßnahmen zur Emissionsreduktion im Bereich Transport können anhand der Pyramide der nachhaltigen Mobilität systematisiert werden, siehe Abbildung 25.

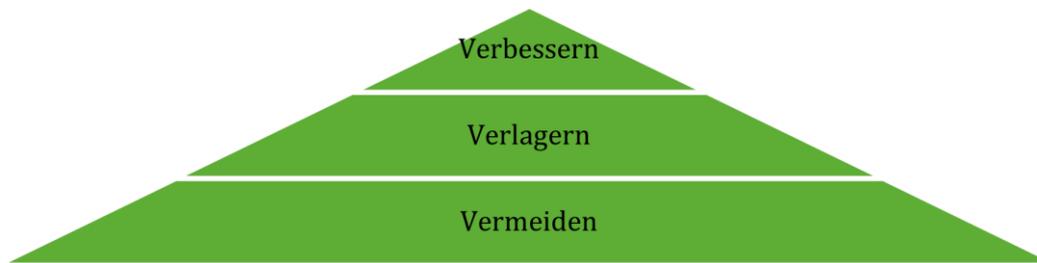
- ▶ Eine **Verkehrsvermeidung** kann zum einen durch kürzere Wege erreicht werden. Zum anderen können auch Fahrten vermieden werden, indem die Auslastung von bestehenden Fahrten gesteigert wird. Beide Mechanismen bewirken eine Reduktion der Fahrleistung (Einheit: Fahrzeug-Kilometer). Durch höhere Auslastung kann zwar der Energieverbrauch der einzelnen Fahrzeuge steigen, jedoch steht dem i. d. R. die Vermeidung anderer Fahrten gegenüber, so dass insgesamt eine Emissionsminderung erreicht wird. Ein ähnlicher Effekt ergibt sich durch die Steigerung der Kapazität einzelner Fahrzeuge, z. B. durch den Einsatz von Lang-Lkw¹⁰ oder längerer Züge im Schienengüterverkehr.
- ▶ Auch die **Transportverlagerung** von der Straße auf die - pro Transportleistung deutlich emissionsärmeren - Verkehrsträger Schiene und (Binnen-)Schiff kann im Saldo

¹⁰ Verwendete Quellen und Berechnung siehe Abschnitt 0

Emissionsminderungen bewirken.¹¹ Dabei reduzieren sich die Emissionen des Straßenverkehrs, wogegen die Emissionen im Schienenverkehr steigen.

- Der letzte Aspekt, die „**Verbesserung**“, subsumiert sowohl Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz der einzelnen Fahrzeuge (z. B. durch Verringerung der Fahrwiderstände oder Erhöhung der Antriebseffizienz) als auch den Einsatz alternativer Antriebskonzepte mit prinzipbedingt geringeren Emissionen pro Antriebsleistung.

Abbildung 25: Pyramide der nachhaltigen Mobilität



Quelle: Eigene Darstellung (ifeu).

4.3.2 Ansatz zur Quantifizierung der Maßnahmen

Um die absoluten Emissionen aus einem Prozess zu erhalten, wird allgemein eine Aktivitätsgröße mit einem dazugehörigen Emissionsfaktor multipliziert:

$$\text{Absolute Emissionen} = \text{Aktivitätsgröße} \cdot \text{Emissionsfaktor}$$

Die relevanten Aktivitätsgrößen und Emissionsfaktoren sind dabei vom betrachteten Logistikbereich abhängig und werden in diesem Abschnitt kurz erläutert. Die nachfolgend beschriebenen Größen und ihre Zusammenhänge bilden den Kern eines im Projekt entwickelten Bilanzierungsmodells, mit dessen Hilfe die Wirkungsquantifizierung erfolgte (siehe Kap. 5). Das Modell ermöglicht die Berechnung der Treibhausgasemissionen CO₂ und CO_{2eq}, der Luftschadstoffemissionen von HC, CO, NO_x, PM, NMHC, SO₂ sowie des Endenergieverbrauchs. Zwar erfolgt keine Bestimmung der Wirkung der Schadstoffe auf Mensch und Umwelt (es handelt sich also um eine Mid-point-Analyse), jedoch können zumindest beim Straßenverkehr zusätzlich die innerhalb von Stadtgebieten (Straßenanteile innerorts) emittierten Mengenanteile ermittelt werden.

Transport

Gängige Aktivitätsgrößen im Straßenverkehr sind Transportleistung (Einheit im Güterverkehr: Tonnenkilometer [tkm]) und Fahrleistung (Einheit: Fahrzeugkilometer [vkm]). Mit der Frachtkapazität der einzelnen Fahrzeuge und deren Auslastungsgrad stehen diese Größen in folgendem Zusammenhang:

$$\text{Transportleistung} = \text{Fahrleistung} \cdot \text{Kapazität} \cdot \text{Auslastung}$$

Änderungen der Fahrleistung oder des Auslastungsgrads führen demnach zu einer Änderung der Transportleistung (bei ansonsten gleichen Bedingungen). Auch die Kapazität eines Fahrzeugs kann sich durch bestimmte Maßnahmen ändern.¹²

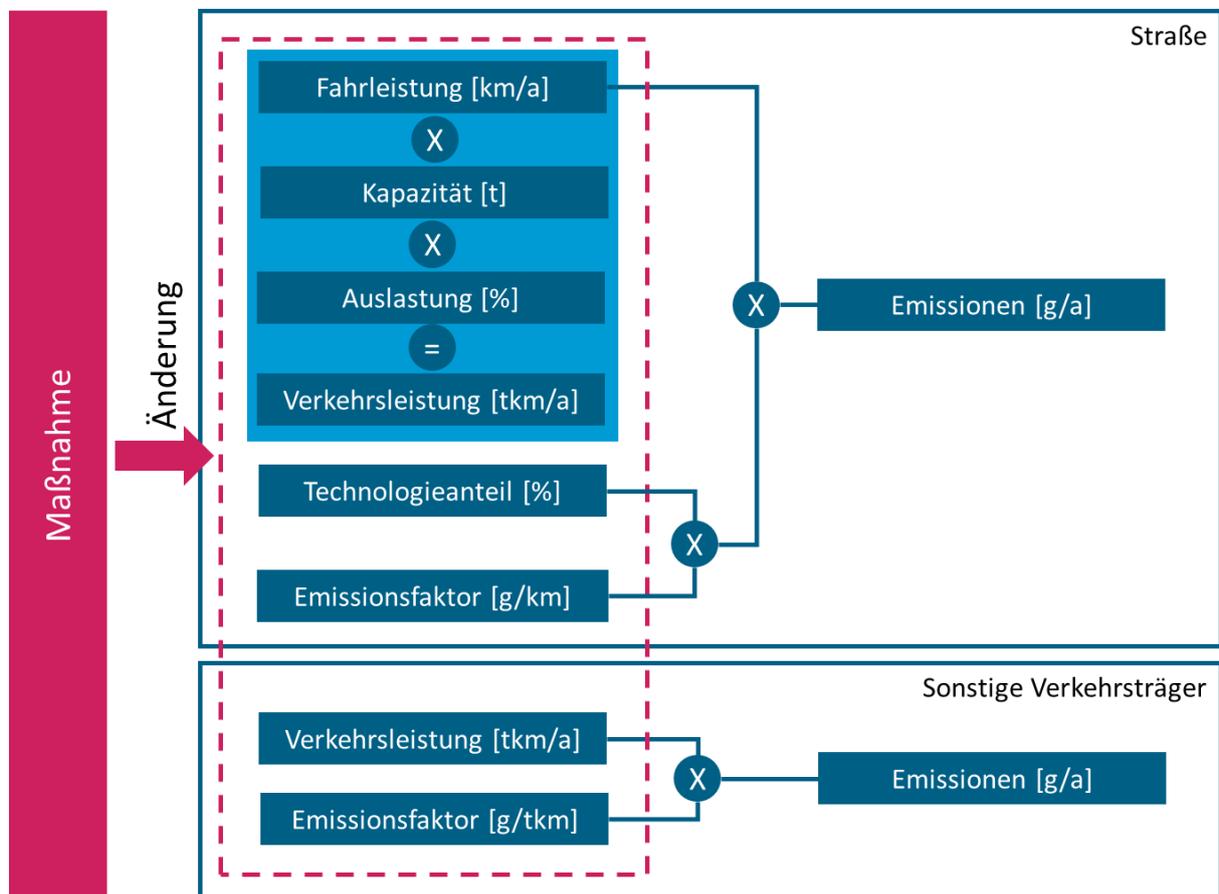
¹¹ Zwar steigt bei Verlagerung in vielen Fällen die Transportleistung durch die direkteren Wege auf der Straße, jedoch sind die spezifischen Emissionen pro tkm um den Faktor 3-4 bei Bahn und Binnenschiff besser als beim Straßentransport.

¹² Die volumetrische Kapazität wird im Rahmen einer Maßnahme (Lang-Lkw) variiert.

Die Emissionsfaktoren (z. B. CO₂) werden im Straßenverkehr in Gramm pro Fahrzeugkilometer und bei den sonstigen Verkehrsträgern in Gramm pro Tonnenkilometer gegeben. Sie können einerseits direkt durch Maßnahmen beeinflusst werden. So reduziert bspw. Eine Maßnahme, die den Luftwiderstand eines Fahrzeugs verringert, auch dessen Energieverbrauch und somit den Emissionsfaktor. Zudem hängen die Emissionsfaktoren vom Antriebssystem ab und werden somit durch Maßnahmen beeinflusst, die sich auf die Wahl der Antriebstechnologie auswirken.

Andererseits kann eine Erhöhung der Auslastung beim Straßenverkehr indirekt eine Erhöhung der fahrzeugspezifischen Emissionsfaktoren aufgrund des erhöhten Energieverbrauchs bei höherem Transportgewicht bewirken. Bei der Abbildung von Maßnahmen, die eine Verkehrsverlagerung von der Straße auf Schiene oder Binnenschiff bewirken, wird hingegen vereinfachend angenommen, dass die Auslastung bei allen Verkehrsträgern konstant bleibt. Abbildung 26 fasst die genannten Größen schematisch zusammen.

Abbildung 26: Schematische Darstellung des Zusammenhangs relevanter Berechnungsgrößen – Bereich Transport



Quelle: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkungen: Straßenverkehr: Transportleistung (Fahrleistung, Kapazität, Auslastung) differenziert nach Güterabteilung, Distanzklasse, Größenklasse und Straßenkategorie; Technologieanteile differenziert nach Größenklasse; Emissionsfaktoren differenzieren nach Auslastung, Straßenkategorie und Größenklasse. Sonstige Verkehrsträger: Transportleistung und dazugehörige Emissionsfaktoren differenziert nach Güterabteilung.

Durch die differenzierten Datengrundlagen im Bereich Transport (siehe Abschnitt 1) kann der Anwendungsbereich der modellierten Maßnahmen für die Berechnung gut eingegrenzt werden. Bei der Eingrenzung werden die Güterabteilungen, die Fahrzeuggrößenklassen sowie die Distanzklassen der Transporte berücksichtigt. So ist es beispielsweise unwahrscheinlich, dass kurze Transporte (z. B. <50km) auf die Schiene bzw. die Binnenschifffahrt verlagert werden, wogegen bei einem kleinen Transportvolumen bspw. Lastenräder zum Einsatz kommen

könnten. Zudem gibt es einige Güterabteilungen, die geringere Hürden für eine Verlagerung aufweisen als andere (z. B. unverderbliche und zeitunkritische Güter).

Bei der Verlagerung ist zudem der Wirkzusammenhang mitunter komplexer. Ein Beispiel ist die Verlagerung von Paketzustellungen von kleineren Lkw und leichten Nutzfahrzeugen auf Lastenräder¹³. Die Betrachtung ist hier auf den Nahverkehr <50 km eingegrenzt. Durch die Einführung von Mikrodepots und der Zustellung per E-Lastenrad werden zwar innerstädtische Fahrten von insbesondere leichten Nutzfahrzeugen vermieden, jedoch sind die Pakete gesammelt zu dem Mikrodepot zu transportieren. Dieser Transport erfolgt, sofern das Mikrodepot als Wechselbrücke komplett transportiert wird, mit einem großen Lkw (>26t). Im Rahmen des Projekts wird von diesem Fall ausgegangen, wobei es in der praktischen Umsetzung auch andere Konzepte gibt.

Auch bei fahrzeugseitigen Maßnahmen können Güterabteilungen, Größen- und Distanzklassen einen Einfluss auf Umsetzbarkeit und das Potenzial einer Maßnahme haben. So sind kurze Distanzen technisch gesehen vorteilhafter für Abwicklung mit Elektrofahrzeugen als Fahrten im Fernverkehr, wohingegen Verbesserungen der Aerodynamik ein höheres Potenzial im Fernverkehr als im Nahverkehr aufgrund der höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten aufweisen. Konkret erfolgt beispielsweise bei der Nachtlogistik¹⁴ die nahräumliche Zustellung von Waren per Elektrofahrzeug. Diese Maßnahme wirkt über zwei Mechanismen: Zum einen weisen Elektrofahrzeuge geringere spezifische CO₂-Emissionen auf, zum anderen ist der flüssigere Verkehr in der Nacht für den Verbrauch vorteilhaft. Beide Aspekte bewirken eine Reduktion der spezifischen CO₂-Emissionen.

Lagerei

Bei der Lagerlogistik wird für die Emissionsberechnung die Fläche des Lagers als Aktivitätsgröße herangezogen. Aus den verfügbaren Statistiken ist die Fläche aller Lagerimmobilien differenziert nach Lagertyp (Kühl-, Standardlager), Automatisierungsgrad (manuell, teil-, vollautomatisiert), Beheizung (beheizt, unbeheizt) und Alter/Sanierungsstand (<30a oder saniert, >30a und unsaniert) angegeben. Bei allen Immobilien wird von einer konstanten Auslastung ausgegangen. So bewirkt eine Reduktion der Lagerfläche eine proportionale Senkung der beim Betrieb des Lagers entstehenden Emissionen.

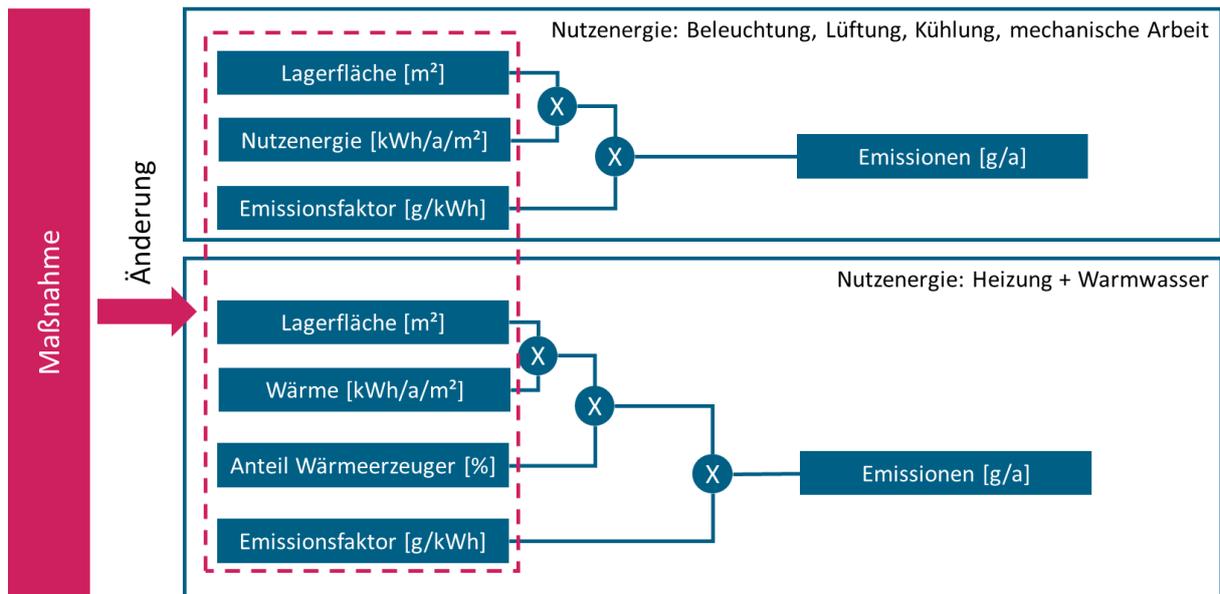
Für die genannten Differenzierungen sind jeweils typische Energieverbräuche (Einheit: kWh/a/m²) für verschiedene Arten von Verbrauchern gegeben (z. B. Heizung, Beleuchtung oder Transport innerhalb des Lagers, siehe Abschnitt 1). So hat bspw. Ein automatisiertes Lager einen anderen Heizbedarf als ein manuelles Lager. Eine Maßnahme „verbessertes Beleuchtungskonzept“ würde den Energieverbrauch für Beleuchtung senken.

Für die Beleuchtung, Lüftung, Kühlung und Stapler/mechanische Arbeit werden typische Emissionsfaktoren (Einheit: Gramm pro kWh) angegeben, die durch bestimmte Maßnahmen verändert werden können. In diese Emissionsfaktoren gehen sowohl Wirkungsgrade (z. B. Leistungszahl der Kältemaschine) als auch Energieträger (z. B. Strom bei Beleuchtung, Diesel, LPG oder Strom bei Gabelstaplern) ein. Bei der Nutzenergie Wärme (Heizung + Warmwasser) erfolgt zusätzlich eine Differenzierung nach Wärmeerzeuger. Die Emissionsfaktoren werden hier auf den Endenergiebedarf der Wärmeerzeuger bezogen. Abbildung 27 illustriert die verwendeten Berechnungsgrößen und die Berechnungslogik für die Quantifizierung von Maßnahmen im Bereich Lagerei.

¹³ Verwendete Quellen und Berechnung siehe Abschnitt 1

¹⁴ Verwendete Quellen und Berechnung siehe Abschnitt 5.1

Abbildung 27: Schematische Darstellung von Zwischengrößen für die Berechnung – Lagerei

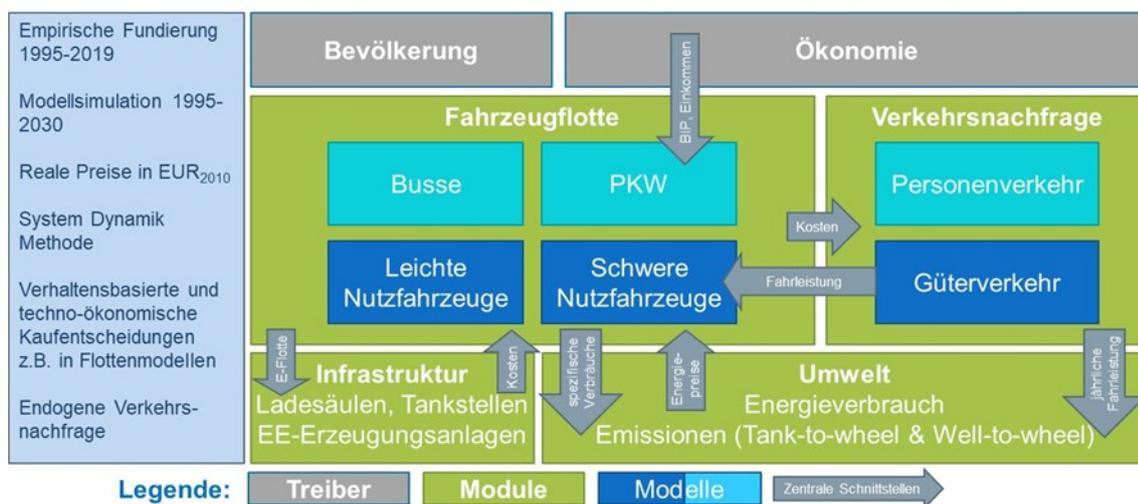


Quelle: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkungen: Lagerflächen und dazugehörige Nutzenergien differiert nach Lagertyp, Lagerart, Beheizung und Alter/Sanierungsstand. Emissionsfaktoren pro Nutzenergie (außer Wärme) gegeben. Emissionsfaktoren für Wärme pro Energieenergiebedarf pro Wärmeerzeuger gegeben.

4.4 Gesamtwirtschaftliche Rückkopplungen nach ASTRA

Mit dem ASTRA-Modell für Deutschland (ASTRA-D) kann die Wirkung von politischen Maßnahmen und Marktentwicklungen auf den Treibhausgasausstoß im Güterverkehr berechnet werden. In einem makroökonomischen Modul wird die anhand des BIP die produzierte Gütermenge berechnet, die auf NUTS-2-Ebene auf Quell- und Zielzonen verteilt werden. In einer logistischen Funktion werden anhand der kumulierten finanziellen und Zeitkosten die Verteilung der Güter auf Straße (leichte, mittlere, schwere Lkw), Schiene und Flussschifffahrt verteilt. Die Struktur des ASTRA-D-Modells ist in Abbildung 28 dargestellt.

Abbildung 28: Modell-Struktur von ASTRA-D



Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer ISI).

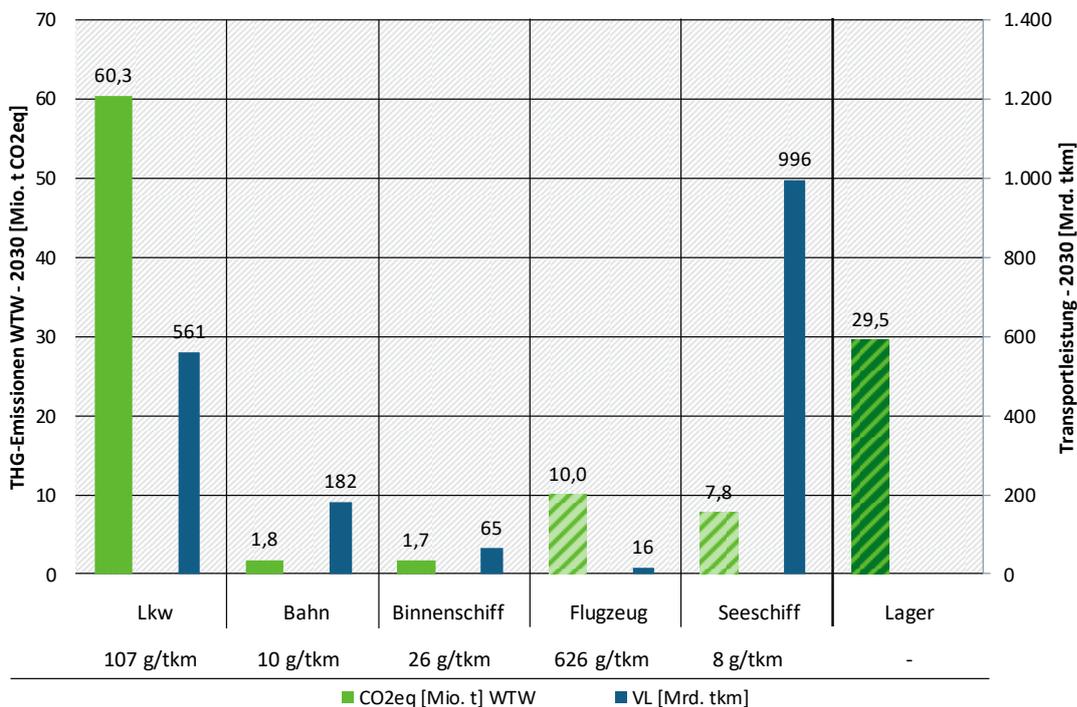
4.5 Referenzszenario

Das Referenzszenario beschreibt den Güterverkehr im Betrachtungsjahr 2030, ohne dass die Realisierung einer der in Kap. 5 analysierten Maßnahmen angenommen wurde. Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen für das Referenzszenario eine Übersicht der THG-Emissionen (WTW) und der NO_x-Emissionen (TTW) für alle Verkehrsträger¹⁵ und den Bereich Lagerei. Für das Referenzszenario werden nachfolgend wichtige Annahmen, Datengrundlagen und Kenngrößen dargestellt.

Abbildung 29: THG-Emissionen und Transportleistung im Jahr 2030 des Referenzszenarios

THG-Emissionen 2030 - Gesamtübersicht

Mio. t CO₂eq WTW



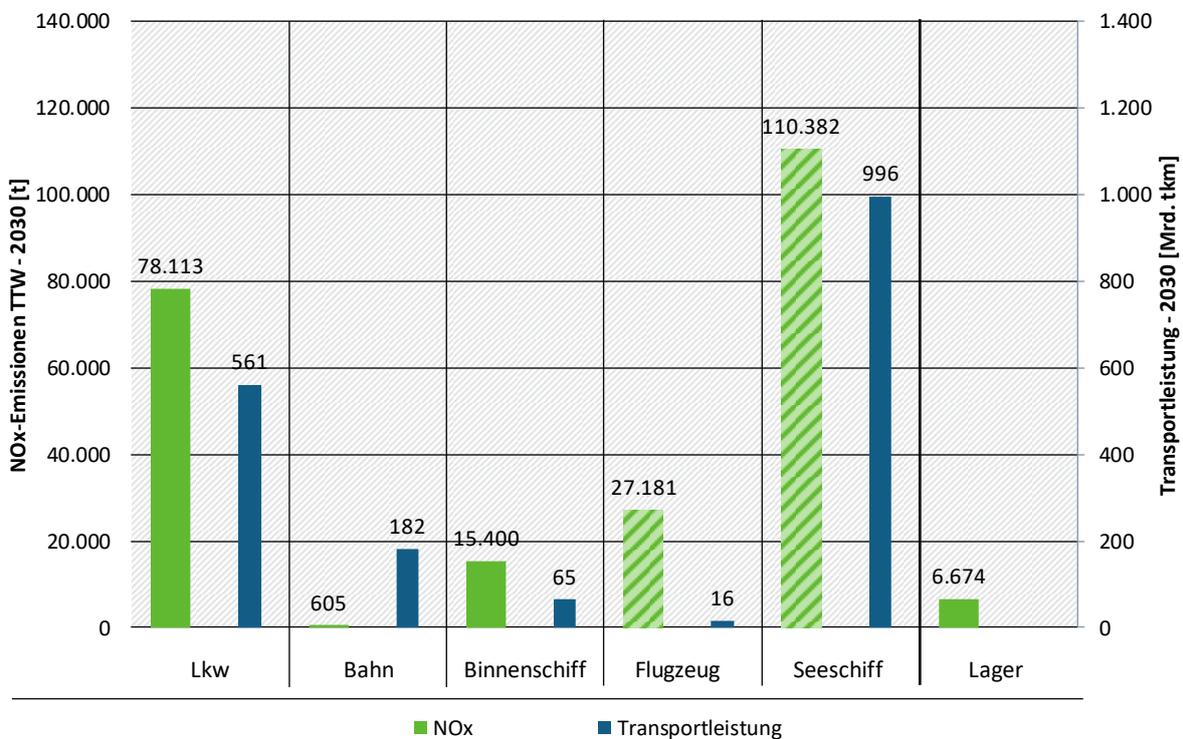
Quelle: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkungen: Schraffiert dargestellte Verkehrsmittel mit abweichender Bilanzierungsmethode. Zusätzlich werden die spezifischen THG-Emissionen pro Transportleistung gegeben. Ein Vergleich der Werte ist jedoch aufgrund der z. T. sehr unterschiedlichen Einsatzbereich nur bedingt möglich.

¹⁵ Die Emissionen des Flugverkehrs und der Seeschifffahrt sind nur begrenzt vergleichbar mit den sonstigen Werten aufgrund der abweichenden Bilanzierungsmethode, siehe Abschnitt 4.2.

Abbildung 30: NO_x-Emissionen im Jahr 2030 des Referenzszenarios – Gesamtübersicht

NO_x-Emissionen und VL 2030 - Gesamtübersicht

TTW - NO_x in t



Quelle: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkungen: Schraffiert dargestellte Verkehrsmittel mit abweichender Bilanzierungsmethode. Dargestellt werden im Gegensatz zu den THG-Emissionen die NO_x-Emissionen nur TTW, da hier der Emissionsort relevant ist und die Emissionen, die bspw. in der Raffinerie entstehen von untergeordneter Relevanz sind.

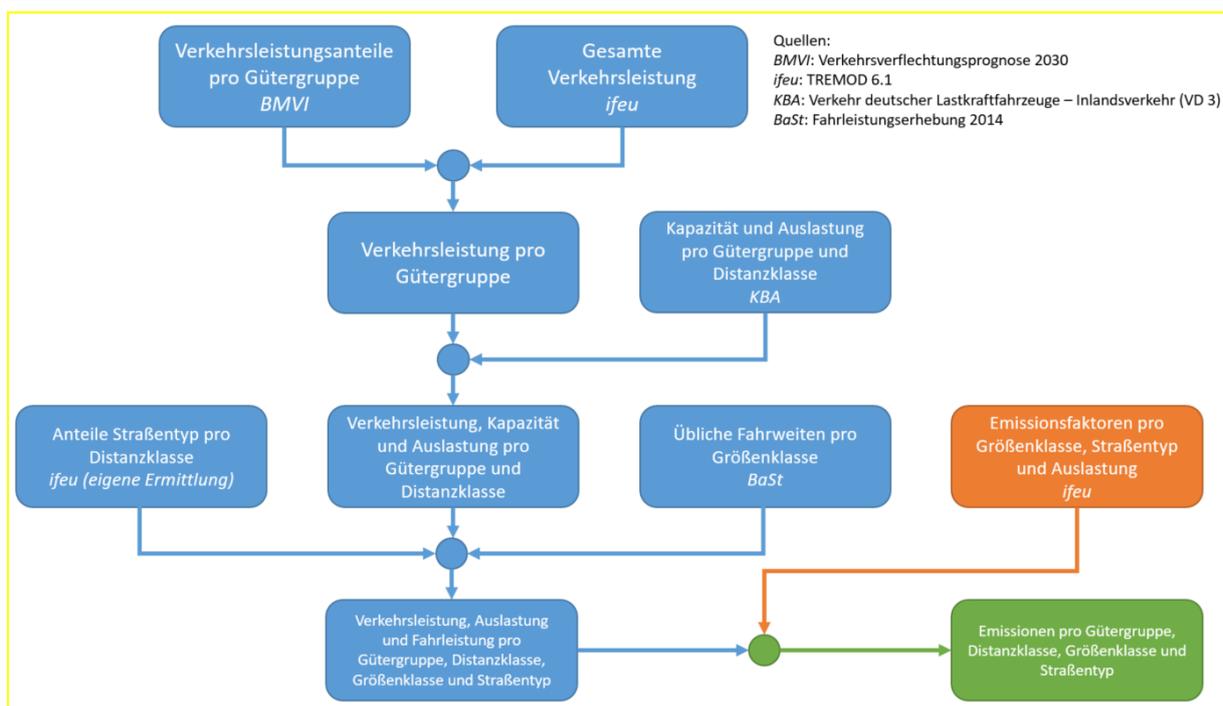
4.5.1 Transport

Die angenommenen Gesamtverkehrsmengen der Verkehrsträger Straße, Schiene, Binnenwasserstraßen und Luft im Jahr 2030 basieren auf dem Trend-Szenario des Modells TREMOD in der Version 6.16 (Knörr et al., o. J.). Das Trend-Szenario enthält Prognosen zu den Verkehrsmengen dieser Verkehrsträger auf Basis vom Klimaschutzprogramm 2030 (Harthan et al., 2020). Technische Entwicklungen zu bspw. Den Antriebstechnologieanteilen und spezifischen Verbräuchen bei Lkw oder den Biokraftstoffanteilen entsprechen den aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen. Die Seeschifffahrt ist durch TREMOD nicht abgedeckt, sodass hier eine getrennte Betrachtung notwendig ist.

Straße

In TREMOD ist der Straßengüterverkehr bereits nach Lkw-Größenklassen und Straßenkategorien differenziert. Darüber hinaus erfolgt die Aufteilung der Verkehrsmengen auf Güterabteilungen und Entfernungsklassen analog zu dem Vorgehen aus dem UBA-Projekt „Modellintegration des Transport-Visualisierungsmodells (TraViMo) und dem Transport Emission Model (TREMOD)“ (FKZ 3720 58 106 0). Die Entwicklung der Anteile der Verkehrsmengen pro Güterabteilung an der Gesamtverkehrsmenge wird gemäß der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 (Intraplan, 2014) fortgeschrieben. In Abbildung 31 ist dieses Vorgehen schematisch dargestellt.

Abbildung 31: Vorgehen bei der Differenzierung des Straßengüterverkehrs



Quelle: Eigene Darstellung (ifeu).

Abbildung 32 und Tabelle 22 zeigen die resultierenden THG-Emissionen differenziert nach Distanzklasse, Größenklasse und Güterabteilung. Diese Darstellung stellt bereits eine Aggregation der verwendeten Daten dar. Die detaillierten Werte sind im Anhang A3 zu finden. Insgesamt betragen die THG-Emissionen des Straßengüterverkehrs ca. 60 Mio. t CO_{2eq} bei einer Transportleistung von 561 Mrd. tkm.

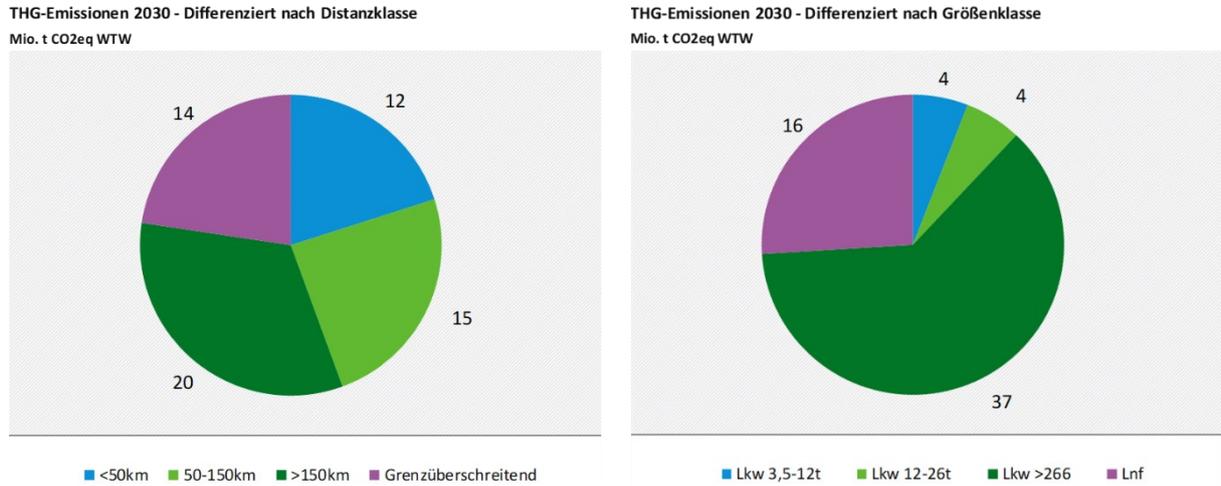
Der Straßenverkehr wird insb. durch den Fernverkehr dominiert. So weisen innerdeutsche Verkehre >150 km und internationale Verkehre einen Anteil an der Straßentransportleistung von knapp 60 % auf. Maßnahmen, die auf den Fernverkehr wirken, können somit hohe Einsparpotenziale erreichen. Dem internationalen Verkehr ist besondere Beachtung zu schenken, da Maßnahmen hier oftmals nicht isoliert vom Ausland umgesetzt werden können. Der Nahverkehr weist demgegenüber nur einen Anteil von ca. 20 % auf. Bezogen auf die THG-Emissionen sind somit Maßnahmen, die vorrangig den Nahverkehr beeinflussen, tendenziell nicht mit hohen absoluten THG-Minderungen verbunden. Nichtsdestoweniger sind dies Fahrten, die durch einen hohen Innerortsfahranteil gekennzeichnet sind. Demnach sind die aus Nahverkehrsfahrten resultierenden Luftschadstoffemissionen potenziell von hoher Relevanz.

Ein Großteil der THG-Emissionen entfällt auf große Lkw >26t. Diese werden insb. auf Langstrecken eingesetzt. Einen nennenswerten Anteil weisen auch LNF auf, jedoch ist hier bei vielen Fahrten eine Differenzierung zwischen Güter- und Personenverkehr nicht eindeutig möglich. Grund hierfür sind bspw. Fahrten von Handwerkern zu Kunden, die sowohl dem Transport der Handwerker als auch der benötigten Werkzeuge und Materialien dienen.

Bei den Güterabteilungen haben „Nahrungs- und Genussmittel“ (GA 4) und „Metalle und Halbzeug“ (GA 10) die höchsten Anteile an der Transportleistung. Einen geringen Anteil weisen „Kohle, rohes Erdöl und Erdgas“ (GA 2) sowie „Kokerei- und Mineralölerzeugnisse (GA 7) auf. Diese beiden Güterabteilungen werden zu großen Teilen über andere Verkehrsmittel (Bahn, Binnenschiff) oder bei Erdgas über Pipelines transportiert. Den größten Anteil weisen die nicht identifizierbaren Güter auf (GA 19, id.R. Container). Dies erschwert die Einordnung von

Maßnahmenwirkungen, da sich unter dieser Güterabteilung sämtliche Güter, der anderen Gruppen verbergen könnten.

Abbildung 32: THG-Emissionen Straße 2030 im Referenzszenario differenziert nach Distanzklasse und Lkw-Größenklasse



Quelle: Eigene Darstellung (ifeu).

Tabelle 22: THG-Emissionen Straße 2030 im Referenzszenario differenziert nach Güterabteilung

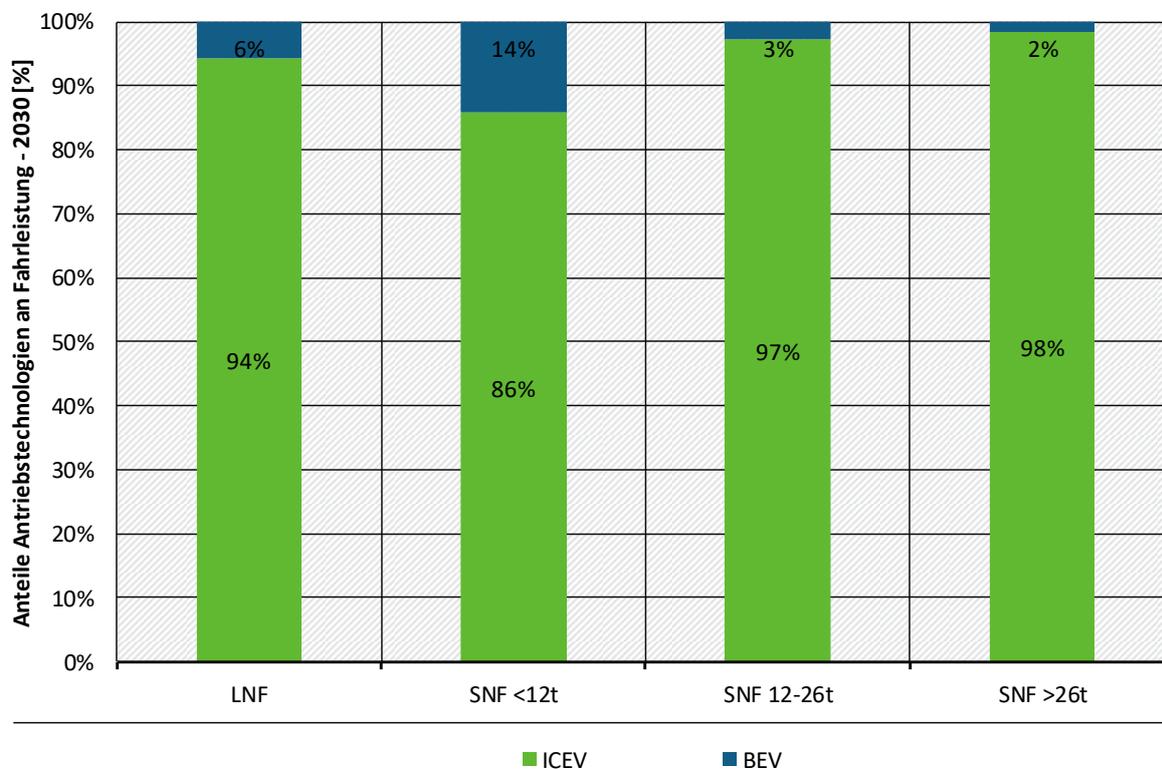
Abteilung	Bezeichnung	THG-Emissionen WTW
GA01	Erzeugnisse der Landwirtschaft	3,19 Mio. t CO _{2eq}
GA02	Kohle; rohes Erdöl und Erdgas	0,06 Mio. t CO _{2eq}
GA03	Erze, Steine und Erden	2,24 Mio. t CO _{2eq}
GA04	Nahrungs- und Genussmittel	7,63 Mio. t CO _{2eq}
GA05	Textilien und Bekleidung	0,89 Mio. t CO _{2eq}
GA06	Holz, Papier	3,76 Mio. t CO _{2eq}
GA07	Kokerei- und Mineralölerzeugnisse	0,52 Mio. t CO _{2eq}
GA08	Chemische Erzeugnisse	3,05 Mio. t CO _{2eq}
GA09	Sonstige Mineralerzeugnisse	3,77 Mio. t CO _{2eq}
GA10	Metalle und Halbzeug	4,18 Mio. t CO _{2eq}
GA11	Maschinen und Ausrüstungen	2,09 Mio. t CO _{2eq}
GA12	Fahrzeuge	2,53 Mio. t CO _{2eq}
GA13	Möbel, Schmuck und sonstige Erzeugnisse	0,92 Mio. t CO _{2eq}
GA14	Sekundärrohstoffe	3,04 Mio. t CO _{2eq}
GA15	Post, Pakete	1,40 Mio. t CO _{2eq}
GA16	Geräte und Material für die Güterbeförderung	2,73 Mio. t CO _{2eq}
GA17	Im Rahmen von Umzügen beförderte Güter	1,12 Mio. t CO _{2eq}
GA18	Sammelgut	3,17 Mio. t CO _{2eq}
GA19	Nicht identifizierbare Güter	14,05 Mio. t CO _{2eq}
GA20	Sonstige Güter	-

Anmerkungen: In TREMOD ist keine Transportleistung für LNF definiert. Diese wurde anhand der Fahrleistung abgeschätzt. GA20 weist keine Transportleistung auf. Detaillierte GA-Bezeichnung siehe Anhang A1.

Die Emissionsfaktoren pro Straßenkategorie und Größenklasse werden direkt aus TREMOD 6.16 übernommen. Die unterschiedliche typische Fahrzeugauslastung je nach Güterabteilung und Distanzklasse wird analog zum Vorgehen im UBA-Projekt „Modellintegration des Transport-Visualisierungsmodells (TraViMo) und dem Transport Emission Model (TREMOD)“ berücksichtigt. Demnach weisen Gütergruppen mit einer hohen durchschnittlichen Beladung zwar höhere Verbräuche pro Fahrzeugkilometer auf, aber der Verbrauch pro Tonnenkilometer ist geringer. Die Auslastung bei Fernfahrten ist generell höher als im Nah- und Regionalverkehr. Bei den Emissionsfaktoren und Verbräuchen werden implizit die Antriebstechnologieanteile berücksichtigt.

Abbildung 33: Antriebstechnologien im Straßengüterverkehr im Jahr 2030 des Referenzszenarios

Anteile Antriebstechnologien an der Fahrleistung - Straße 2030



Quelle: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkungen: ICEV – Fahrzeug mit Verbrennungskraftmaschine, BEV – Fahrzeug mit batterieelektrischen Antrieb.

Schiene

Transportleistung sowie Emissionsfaktoren für den Schienengüterverkehr werden ebenfalls TREMOD entnommen. Die Methodik zur Aufteilung der Transportleistung auf die Güterabteilungen wird analog zum Straßenverkehr vorgenommen. Die Transportleistung pro Güterabteilung wird für das Jahr 2019 aus Destatis (Tabelle 46131-0005)¹⁶ zugrunde gelegt und gemäß der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 (Intraplan, 2014) fortgeschrieben. Die hieraus resultierende Transportleistung wird auf die absolute Transportleistung aus TREMOD i. H. v. 182 Mrd. tkm skaliert.

Die Emissionsfaktoren pro tkm werden direkt aus TREMOD verwendet. Der überwiegende Teil des Transports erfolgt elektrisch (>90 %). Hier sind aufgrund der im Vergleich zum Straßenverkehr größeren Datenstruktur keine weiteren Differenzierungen möglich, sodass für alle Güterabteilungen dieselben Emissionsfaktoren verwendet werden. Daher ergeben sich für die gesamten Emissionen pro Güterabteilung dieselben prozentualen Aufteilungen wie bei der Transportleistung. Die gesamten Emissionen des Schienengüterverkehrs werden im Anhang A3 angegeben. Die THG-Emissionen (WTW) des Schienengüterverkehrs in Deutschland summieren sich im Jahr 2030 auf 1,79 Mio. t CO_{2eq}. Es ergibt sich die Aufteilung auf die Güterabteilungen gemäß Tabelle 23. Unter der Güterabteilung 19 verbergen sich „nicht identifizierbare Güter“. Dies sind insbesondere Transporte von Containern (z. B. von Importen aus Seehäfen), deren

¹⁶ <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online> (20.09.2022)

Inhalt nicht bekannt ist. Diese Güterabteilung weist den größten Anteil auf. Die Güter der GA 19 wären prinzipiell den anderen Güterabteilungen zuzurechnen, sofern der Inhalt bekannt wäre. Große Anteile weisen auch die Güterabteilungen „Erze, Steine und Erden“ (GA 3), „Kokerei- und Mineralölerzeugnisse“ (GA 7) und „Metallerzeugnisse“ (GA 10) auf.

Tabelle 23: THG-Emissionen Schiene 2030 im Referenzszenario differenziert nach Güterabteilung

Abteilung	Bezeichnung	THG-Emissionen WTW
GA01	Erzeugnisse der Landwirtschaft	40.000 t CO _{2eq}
GA02	Kohle; rohes Erdöl und Erdgas	57.000 t CO _{2eq}
GA03	Erze, Steine und Erden	184.000 t CO _{2eq}
GA04	Nahrungs- und Genussmittel	20.000 t CO _{2eq}
GA05	Textilien und Bekleidung	-
GA06	Holz, Papier	56.000 t CO _{2eq}
GA07	Kokerei- und Mineralölerzeugnisse	160.000 t CO _{2eq}
GA08	Chemische Erzeugnisse	121.000 t CO _{2eq}
GA09	Sonstige Mineralerzeugnisse	37.000 t CO _{2eq}
GA10	Metalle und Halbzeug	157.000 t CO _{2eq}
GA11	Maschinen und Ausrüstungen	6.000 t CO _{2eq}
GA12	Fahrzeuge	119.000 t CO _{2eq}
GA13	Möbel, Schmuck und sonstige Erzeugnisse	-
GA14	Sekundärrohstoffe	34.000 t CO _{2eq}
GA15	Post, Pakete	-
GA16	Geräte und Material für die Güterbeförderung	59.000 t CO _{2eq}
GA17	Im Rahmen von Umzügen beförderte Güter	-
GA18	Sammelgut	29.000 t CO _{2eq}
GA19	Nicht identifizierbare Güter	708.000 t CO _{2eq}
GA20	Sonstige Güter	2.000 t CO _{2eq}

Anmerkungen: GA05, GA13, GA15, GA17 weisen keine Transportleistung auf. Detaillierte GA-Bezeichnung siehe Anhang A1.

Binnenwasserstraße

Für die absolute Transportleistung der Binnenschifffahrt werden Angaben aus TREMOD verwendet. Die Aufteilung der Transportleistung auf die Güterabteilungen wird methodisch analog zum Schienenverkehr durchgeführt. Die Transportleistung wird für das Jahr 2019 aus Destatis (Tabelle 46321-0007)¹⁷ übernommen und gemäß der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 (Intraplan, 2014) fortgeschrieben. Hieraus resultiert eine gesamte Transportleistung der Binnenschifffahrt i. H. v. 65 Mrd. tkm.

Die Emissionsfaktoren der Binnenschiffe stammen ebenfalls aus TREMOD. Hier werden unterschiedliche Emissionsfaktoren in Abhängigkeit der Ladungsart angegeben. Um eine Verknüpfung zu den Güterabteilungen herstellen zu können, werden die Güterabteilungen den Ladungsarten zugeordnet, siehe Tabelle 24.

Tabelle 24: Zuordnung der Güterabteilungen zur Ladungsart bei der Binnenschifffahrt

Ladungsart	Güterabteilungen
Festes Schüttgut	1, 2 (zu 50 %), 3, 6, 7 (zu 50 %), 9, 10, 14
Flüssiges Massengut	2 (zu 50 %), 4, 5, 7 (zu 50 %), 8
Container	-
Sonstige	11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20

Die gesamten Emissionen der Binnenschifffahrt werden im Anhang A3 angegeben. Die WTW THG-Emissionen der Binnenschifffahrt in Deutschland summieren sich im Jahr 2030 auf 1,66 Mio. t CO_{2eq}. Da die Emissionsfaktoren sich nach Ladungsart nur geringfügig unterscheiden, sieht die Aufteilung der THG-Emissionen auf die Güterabteilungen ähnlich aus wie die der Transportleistung. Die THG-Emissionen differenziert nach Güterabteilung sind in Tabelle 25 gegeben. Die größten Anteile weisen die Güterabteilungen „Erze, Steine und Erden“ (GA 3) und „Kokerei- und Mineralölerzeugnisse“ (GA 7) auf.

¹⁷ <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online> (20.09.2022)

Tabelle 25: THG-Emissionen Binnenschifffahrt 2030 im Referenzszenario differenziert nach Güterabteilung

Abteilung	Bezeichnung	THG-Emissionen WTW
GA01	Erzeugnisse der Landwirtschaft	174.000 t CO _{2eq}
GA02	Kohle; rohes Erdöl und Erdgas	143.000 t CO _{2eq}
GA03	Erze, Steine und Erden	333.000 t CO _{2eq}
GA04	Nahrungs- und Genussmittel	71.000 t CO _{2eq}
GA05	Textilien und Bekleidung	1.000 t CO _{2eq}
GA06	Holz, Papier	27.000 t CO _{2eq}
GA07	Kokerei- und Mineralölerzeugnisse	289.000 t CO _{2eq}
GA08	Chemische Erzeugnisse	207.000 t CO _{2eq}
GA09	Sonstige Mineralerzeugnisse	34.000 t CO _{2eq}
GA10	Metalle und Halbzeug	102.000 t CO _{2eq}
GA11	Maschinen und Ausrüstungen	11.000 t CO _{2eq}
GA12	Fahrzeuge	16.000 t CO _{2eq}
GA13	Möbel, Schmuck und sonstige Erzeugnisse	4.000 t CO _{2eq}
GA14	Sekundärrohstoffe	93.000 t CO _{2eq}
GA15	Post, Pakete	-
GA16	Geräte und Material für die Güterbeförderung	17.000 t CO _{2eq}
GA17	Im Rahmen von Umzügen beförderte Güter	-
GA18	Sammelgut	8.000 t CO _{2eq}
GA19	Nicht identifizierbare Güter	132.000 t CO _{2eq}
GA20	Sonstige Güter	-

Anmerkungen: GA15, GA17, GA20 weisen keine Transportleistung auf. Detaillierte GA-Bezeichnung siehe Anhang A1.

Luft

Beim Flugtransport werden die Transportleistung und die Emissionsfaktoren aus TREMOD verwendet. Eine Aufteilung der Transportleistung auf die Güterabteilungen wird hier stark vereinfacht vorgenommen. In TREMOD ist bereits der Anteil der GA 15 (Post, Pakete) i. H. v. 2 % an der gesamten Transportleistung im Luftverkehr direkt gegeben. Die restliche Transportleistung wird GA 19 (nicht identifizierbare Güter) zugeteilt. Der Flugverkehr weist eine gesamte Transportleistung von 16 Mrd. tkm auf, die THG-Emissionen (WTW) von in Deutschland startenden Flugzeugen belaufen sich im Jahr 2030 auf 10 Mio. t CO_{2eq}.

Seegewässer

Die Seeschifffahrt ist nicht in TREMOD enthalten. Das Aufkommen [t] pro Gütergruppe und Ziel-/Quellland wird für das Jahr 2019 aus Destatis (Tabelle 46331-0011)¹⁸ entnommen. Die beim Transport zurückgelegte mittlere Distanz pro Ziel-/Quellland wird über EcoTransIT (2022) abgeschätzt. Hieraus ergibt sich die Transportleistung pro Gütergruppe für das Jahr 2019. Es wird anhand der Statistik und eigenen Annahmen eine Fortschreibung bis zum Jahr 2030 vorgenommen. Diese berücksichtigt die historische Entwicklung von 2011-2019 und aktuelle sowie absehbare Trends. Tabelle 26 zeigt die angenommene Transportleistung der Seeschifffahrt im Jahr 2030. Den größten Anteil hat hier auch die Güterabteilung „nicht identifizierbare Güter“. Dies sind insbesondere Container, deren Inhalt unbekannt ist.

Die Emissionsfaktoren pro tkm werden aus EcoTransIT (2022) abgeleitet. Es wird bei den Emissionen und Verbräuchen eine Verbesserungsrate von 0,5 % p. a. bis 2030 angenommen. Vereinfachend werden für alle Güterabteilungen dieselben Emissionsfaktoren angesetzt. Die sich ergebenden Gesamtemissionen sind im Anhang A3 angegeben. Die THG-Emissionen (WTW) im Jahr 2030 betragen 7,78 Mio. t CO_{2eq}.¹⁹ Tabelle 26 zeigt die THG-Emissionen der Seeschifffahrt im Jahr 2030.

¹⁸ <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online> (20.09.2022)

¹⁹ Zu beachten sind die Bilanzgrenzen: Beim Seeverkehr liegt eine andere Grenze zugrunde als beim Straßenverkehr.

Tabelle 26: Transportleistung und THG-Emissionen Seegewässer 2030 im Referenzszenario differenziert nach Güterabteilung

Abteilung	Bezeichnung	Transportleistung	THG-Emissionen WTW
GA01	Erzeugnisse der Landwirtschaft	64 Mrd. tkm	494.000 t CO _{2eq}
GA02	Kohle; rohes Erdöl und Erdgas	18 Mrd. tkm	147.000 t CO _{2eq}
GA03	Erze, Steine und Erden	68 Mrd. tkm	520.000 t CO _{2eq}
GA04	Nahrungs- und Genussmittel	32 Mrd. tkm	254.000 t CO _{2eq}
GA05	Textilien und Bekleidung	23 Mrd. tkm	170.000 t CO _{2eq}
GA06	Holz, Papier	122 Mrd. tkm	912.000 t CO _{2eq}
GA07	Kokerei- und Mineralölerzeugnisse	17 Mrd. tkm	152.000 t CO _{2eq}
GA08	Chemische Erzeugnisse	68 Mrd. tkm	506.000 t CO _{2eq}
GA09	Sonstige Mineralerzeugnisse	20 Mrd. tkm	156.000 t CO _{2eq}
GA10	Metalle und Halbzeug	52 Mrd. tkm	384.000 t CO _{2eq}
GA11	Maschinen und Ausrüstungen	57 Mrd. tkm	431.000 t CO _{2eq}
GA12	Fahrzeuge	33 Mrd. tkm	247.000 t CO _{2eq}
GA13	Möbel, Schmuck und sonstige Erzeugnisse	25 Mrd. tkm	190.000 t CO _{2eq}
GA14	Sekundärrohstoffe	6 Mrd. tkm	46.000 t CO _{2eq}
GA15	Post, Pakete	-	-
GA16	Geräte und Material für die Güterbeförderung	<1 Mrd. tkm	<1.000 t CO _{2eq}
GA17	Im Rahmen von Umzügen beförderte Güter	<1 Mrd. tkm	2.000 t CO _{2eq}
GA18	Sammelgut	8 Mrd. tkm	63.000 t CO _{2eq}
GA19	Nicht identifizierbare Güter	381 Mrd. tkm	3.101.000 t CO _{2eq}
GA20	Sonstige Güter	1 Mrd. tkm	6.000 t CO _{2eq}

Anmerkungen: GA15 weist keine Transportleistung auf. Detaillierte GA-Bezeichnung siehe Anhang A1.

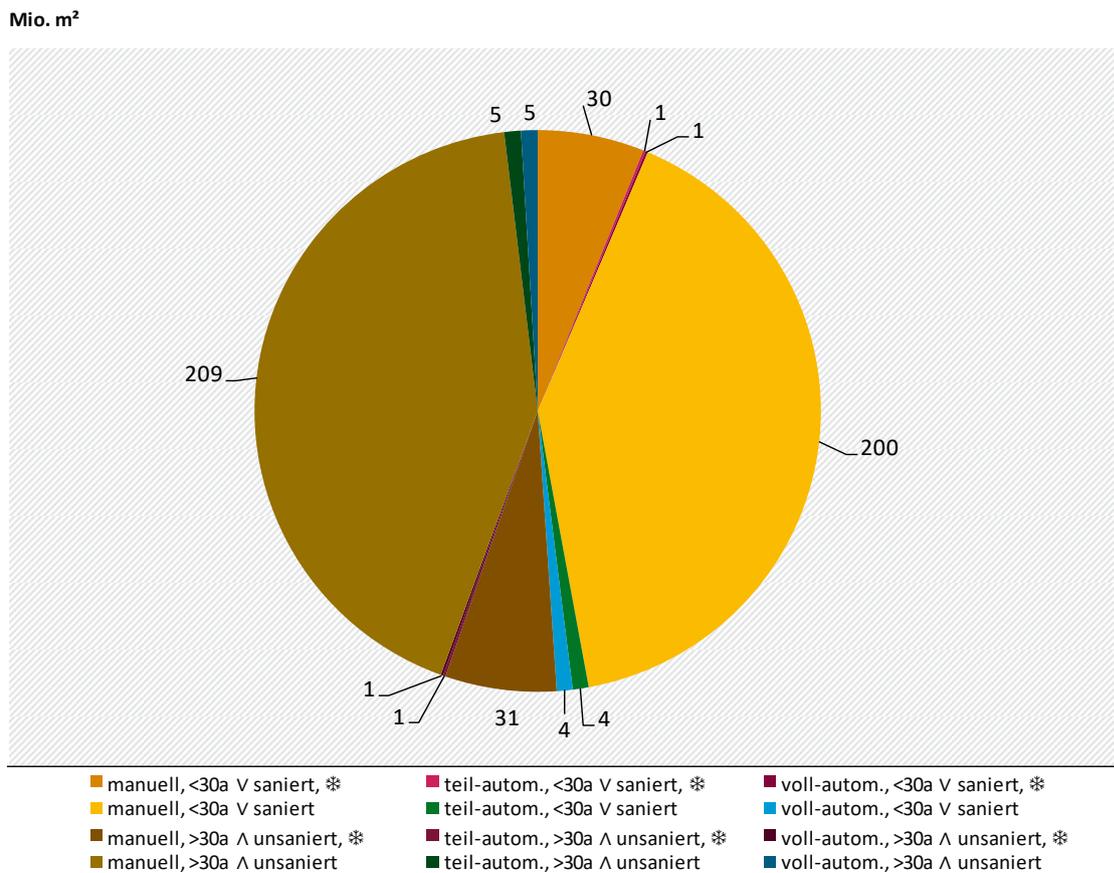
4.5.2 Lagerei

Für die Quantifizierung von Maßnahmen im Bereich Lagerei wurde ein flächenbasiertes Inventar der Logistiklager in Deutschland erstellt, wobei nach verschiedenen Lagerarten differenziert und entsprechende Emissionsfaktoren angewandt werden.

Die Fläche der Lager für das Jahr 2030 wird aus (Feld et al., 2021; Haufe, 2021; IndustrialPort, 2012; JLL, 2022) abgeleitet, die resultierende Gesamtfläche beträgt 491,4 Mio. m². Das Alter der Logistikimmobilien wird über eine eigene Berechnung anhand (Schloman et al., 2013) abgeschätzt. Es wird von einer Sanierungsquote von 1 % p. a. ausgegangen (Rein et al., 2016). Aus beiden Analysen ergibt sich ein Anteil von 49 % an der Lagerfläche für sanierte Gebäude oder Gebäude, die jünger als 30 Jahre sind. Der Rest wird als unsaniert angenommen. Auf dieser Basis werden die Emissionsfaktoren angesetzt. So erhalten bspw. Gebäude, die 10 Jahre alt sind, denselben Emissionsfaktor wie ein saniertes Lager, das 35 Jahre alt ist.

Die Anteile verschiedener Lagerarten werden aus der Datenbank L.Immo (Stand 07/2021) des Fraunhofer SCS für das Jahr 2021 entnommen. Hier wird angegeben, dass ca. 13 % der Lager Kühllager sind. Der Automatisierungsgrad wird ebenfalls über L.Immo abgeleitet. Demnach sind 4 % der Lager automatisiert, wobei pauschal angenommen wird, dass die Hälfte davon teilautomatisiert und die andere Hälfte vollautomatisiert ist. Ebenfalls wird angenommen, dass der Automatisierungsgrad für Standard- und Kühllager gleich ist. Für Gebäude, die nach 2021 in den Bestand kommen, wird ein höherer Automatisierungsgrad in Höhe von 25 % angenommen. Hieraus ergeben sich die Flächen nach Abbildung 34.

Abbildung 34: Lagerflächen im Referenzszenario, Jahr 2030



Quelle: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkungen: * - Kühllager.

Der Nutzenergiebedarf für die Lager wird aus (BBSR, 2019) und (Günthner & Auer, 2014) hergeleitet. Tabelle 27 fasst die Annahmen für Kühllager, Tabelle 28 für beheizte und Tabelle 29 für unbeheizte Lager zusammen.

Tabelle 27: Nutzenergiebedarfe von Kühllagern im Jahr 2030 des Referenzszenarios

Energiebedarfe in kWh/m²/a

Gebäude	Fläche [m ²]	Heizung + Warmwasser	Beleuchtung	Lüftung*	Kühlung*	Mechan. Arbeit
Manuell <30a oder saniert	29.914.619	3	15	12	298	12
Teil-automatisiert <30a oder saniert	665.808	2	11	12	368	59
Voll-automatisiert <30a oder saniert	665.808	2	6	12	470	82
Manuell >30a und unsaniert	31.223.756	5	22	25	403	12
Teil-automatisiert >30a und unsaniert	694.945	5	16	25	473	59
Voll-automatisiert >30a und unsaniert	694.945	5	9	25	575	82

Anmerkungen: *Lüftung inkl. Be- und Entfeuchtung, Kühlung inkl. Hilfsenergie.

Tabelle 28: Nutzenergiebedarfe von beheizten Lagern im Jahr 2030 des Referenzszenarios

Energiebedarfe in kWh/m²/a

Gebäude	Fläche [m ²]	Heizung + Warmwasser	Beleuchtung	Lüftung*	Kühlung	Mechan. Arbeit
Manuell <30a oder saniert	189.288.909	48	15	12	0	12
Teil-automatisiert <30a oder saniert	4.212.990	40	11	12	0	59
Voll-automatisiert <30a oder saniert	4.212.990	32	6	12	0	82
Manuell >30a und unsaniert	197.572.661	164	22	25	0	12
Teil-automatisiert >30a und unsaniert	4.397.360	141	16	25	0	59
Voll-automatisiert >30a und unsaniert	4.397.360	118	9	25	0	82

Anmerkungen: *Lüftung inkl. Be- und Entfeuchtung.

Tabelle 29: Nutzenergiebedarfe von unbeheizten Lagern im Jahr 2030 des Referenzszenarios

Energiebedarfe in kWh/m²/a

Gebäude	Fläche [m ²]	Heizung + Warmwasser	Beleuchtung	Lüftung*	Kühlung	Mechan. Arbeit
Manuell <30a oder saniert	10.972.283	4	15	1	0	12
Teil-automatisiert <30a oder saniert	244.209	3	11	1	0	59
Voll-automatisiert <30a oder saniert	244.209	3	6	1	0	82
Manuell >30a und unsaniert	11.452.457	7	22	1	0	12
Teil-automatisiert >30a und unsaniert	254.897	6	16	1	0	59
Voll-automatisiert >30a und unsaniert	254.897	5	9	1	0	82

Anmerkungen: *Lüftung inkl. Be- und Entfeuchtung.

Die Anteile der Wärmeerzeuger wird über Destatis Fachserie 5 Reihe 1 (Tabelle 3.2.6)²⁰ abgeschätzt. Die folgende Tabelle fasst die Anteile sowie die angenommenen Wirkungsgrade zusammen.

Tabelle 30: Anteile der Wärmeerzeuger und deren Wirkungsgrade im Jahr 2030 des Referenzszenarios

Gebäude	Anteil an Gebäude <30a oder saniert	Anteil an Gebäude >30a und unsaniert	Wirkungsgrad <30a oder saniert	Wirkungsgrad >30a und unsaniert
Öl	11%	58%	70%	80%
Öl – Brennwert	14%	7%	94%	96%
Gas	22%	25%	79%	83%
Gas – Brennwert	28%	3%	96%	101%
Strom direkt	6%	3%	100%	100%
Fernwärme	6%	3%	-	-
Wärmepumpe	8%	0%	260%*	320%*
Regenerativ	5%	1%	-	-

Quellen: Anteile: eigene Ableitung. Wirkungsgrade aus (thermondo, 2022). *Entspricht dem Coefficient of Performance (COP); dieser wird auch vereinfacht für Kältemaschinen angenommen.

Für die Wirkungsgrade der Heizungen und Kältemaschinen werden aktuell durchschnittliche Wirkungsgrade angenommen (thermondo, 2022). Die Anteile von Verbrennungskraftmaschinen an der mechanischen Arbeit bei manuellen und teil-automatisierten Lagern wird über TREMOD-MM (ifeu, 2009) abgeschätzt. Bei vollautomatischen Lagern erfolgt die Energieversorgung ausschließlich elektrisch. Die direkten Emissionsfaktoren sind (Bettgenhäuser & Boermans,

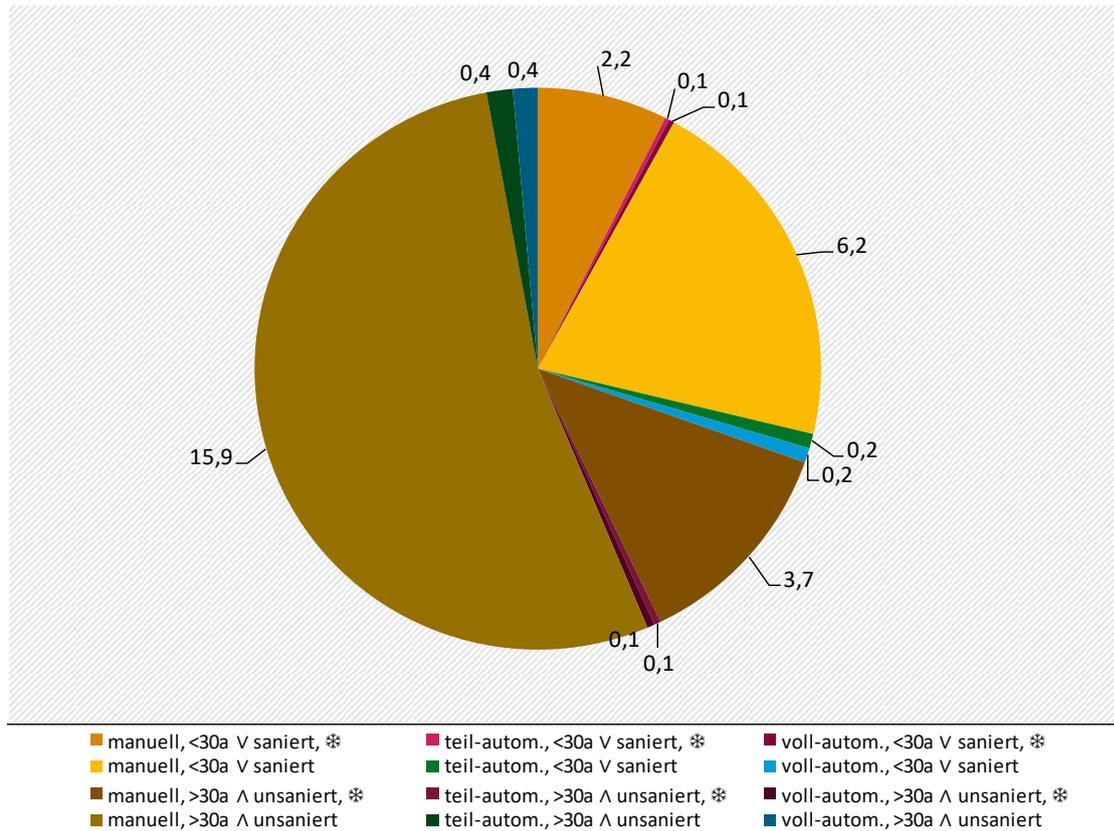
²⁰ <https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/publikationen-fachserienliste-5.html> (20.09.2022)

2011) entnommen. Für die Vorkette werden die TREMOD-Werte verwendet. Aus Multiplikation der Nutzenergiebedarfe mit den Lagerflächen unter Berücksichtigung der Wärmeerzeugeranteile und Wirkungsgrade ergeben sich die Gesamtemissionen. Abbildung 35 zeigt exemplarisch die THG-Emissionen im Jahr 2030 differenziert nach Lagertypen. Insgesamt resultieren aus dem Lagerbetrieb 29,5 Mio. t CO_{2eq} (WTW).

Abbildung 35: THG-Emissionen Lager im Jahr 2030 des Referenzszenarios

THG-Emissionen Lager 2030

Mio. t CO_{2eq} pro Jahr



Quelle: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkungen: * - Kühlager.

5 Wirkungsquantifizierung nachhaltiger Handlungsoptionen der Logistik

Auf Grundlage der im vorangegangenen Kapitel erläuterten Methodik werden nachfolgend die spezifischen Wirkungen nachhaltiger Logistikmaßnahmen quantifiziert und ihre Wirkpotentiale auf Deutschland hochgerechnet.

Dazu müssen zunächst quantifizierbare Maßnahmen ausgewählt werden. Viele Maßnahmen werden in der verfügbaren Literatur in Form von Fallstudien analysiert, ohne die Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle zu untersuchen oder die Ergebnisse gar in eine systemische Betrachtung einzubetten. Eine Reihe von Maßnahmen kann mangels Datengrundlage daher nicht quantifiziert werden, insbesondere Maßnahmen mit folgenden Merkmalen:

- ▶ Rein qualitative Beschreibung bezüglich der Umweltwirkungen
- ▶ Fallbeispiele mit sehr speziellem Anwendungsbereich oder nicht übertragbaren Rahmenbedingungen
- ▶ Maßnahmen, die sich an anderen räumlichen Kontexten orientieren

In einigen Bereichen mussten in der Literatur identifizierte Einzelmaßnahmen für die Quantifizierung zusammengefasst werden, um eine richtungssichere Aussage zu ermöglichen. So ergibt sich schlussendlich eine deutliche Reduktion auf 28 Maßnahmen, deren Wirkpotentiale im Folgenden nach einheitlichem Schema quantifiziert werden. Sie sind in Abbildung 36 gegliedert nach Handlungsfeldern dargestellt. Die Wirkungsquantifizierung bezieht sich dabei stets auf das in Abschnitt 4.5 beschriebene Referenzszenario. Prozentuale Minderungsangaben für THG bzw. NO_x bei einzelnen Maßnahmen beziehen sich immer auf die gesamten Emissionen aus Transport und Lagerei, um einen einheitlichen Bezugspunkt für die Wirksamkeit von Maßnahmen zu gewährleisten. Für die Berechnung der potenziellen Emissionsminderungen wird bei allen Berechnungen eine Bandbreite zwischen einem Minimal- und einem Maximalfall betrachtet. Die Bandbreite spiegelt die Unsicherheit verschiedener Eingangsparameter der Abschätzung wider. Sofern die berücksichtigten Quellen nicht direkt eine Bandbreite möglicher Effekte angeben, werden Abschätzungen hierzu getroffen. Innerhalb dieser Bandbreite wird ein mittlerer Fall definiert, um die Vergleichbarkeit der einzelnen Maßnahmen zu verbessern. Zusätzlich wird noch ein „theoretisches Maximalpotenzial“ angegeben. Dieses zeigt auf, welche Minderungen sich theoretisch erreichen lassen würden, wenn die Maßnahme sowohl in maximal denkbarer Intensität umgesetzt wird als auch eine vollständige Marktdurchdringung erreicht wird. Es gibt insofern einen Anhaltspunkt, in welcher Größenordnung Emissionen über den Betrachtungszeitraum 2030 hinaus durch die Maßnahme prinzipiell eingespart werden könnten.

Mit ihrer Scharnierfunktion zwischen Produktion und Konsum stellt die Logistik ihre klimabilanzielle Bewertung vor Herausforderungen. Emissionen in Seeschifffahrt und internationalem Flugverkehr entstehen größtenteils außerhalb der nationalen Grenzen, sind aber durch Produktion bzw. Konsum in Deutschland bedingt. Sie wurden daher bilanziell zur Hälfte den Emissionen der Logistik in Deutschland zugeschlagen, so dass auch in diesen Bereichen Minderungspotentiale quantifiziert werden können (siehe Abschnitt 4.2). In Einzelfällen gibt es aber auch direkte Wechselwirkungen der Maßnahmen mit dem Bereich Produktion. In solchen Fällen konnten lediglich die emissionsseitigen Auswirkungen der Maßnahmen im Logistikbereich bilanziert werden.

Abbildung 36: Betrachtete Maßnahmen für die THG-Bilanzierung



Quelle: eigene Darstellung

5.1 Handlungsfeld „Prozessoptimierung“

Maßnahmen im Handlungsfeld Prozessoptimierung in der Logistikbranche streben in erster Linie eine ökologisch effiziente Verkehrsmittelwahl an sowie die Reduktion des Verkehrsaufkommens durch effizientere Prozesse. Ein Großteil dieser Maßnahmen basiert auf verstärkter Digitalisierung und Vernetzung. Folgende Maßnahmen wurden in diesem Handlungsfeld quantifiziert:

- ▶ Intelligente Telematik und Datenaustausch
- ▶ Verlagerung Straße auf Schiene
- ▶ Echtzeit optimierte Frachtrouten in urbanen Räumen
- ▶ Paketlieferung per E-Lastenrad
- ▶ Senkung der Retourenquote
- ▶ Vermeidung Leerfahrten
- ▶ Nachtlogistik
- ▶ Seeschiff: Slow Steaming
- ▶ 3D-Druck

Die nachfolgende Abbildung 37 gibt einen Überblick der jeweils quantifizierten THG-Minderungspotentiale. Eine detaillierte Erläuterung zu den einzelnen Maßnahmen erfolgt im Anschluss an die Übersicht des gesamten Handlungsfelds.

Die mit Abstand größten Potentiale konnten für die Verlagerung von der Straße auf die Schiene sowie für die Vermeidung von Leerfahrten berechnet werden, die jeweils bei optimistischen Annahmen ca. 3-4 Mio. t THG jährlich einsparen könnten. Bei beiden Maßnahmen gibt es in der Umsetzung eine Vielzahl von Ansatzpunkten, die unterschiedliche Akteursgruppen betreffen. Für die Verlagerung auf die Schiene besteht die wichtigste Hürde in Kapazitäts- und Qualitätsrestriktionen der Schieneninfrastruktur. Die Vermeidung von Lkw-Leerfahrten erfordert voraussichtlich eine Kombination aus digitalen Prozessinnovationen (z. B. verstärkte Nutzung von Frachtenbörsen), regulatorischen Anpassungen (zur Reduktion von durch Kabotageregelungen bedingten Leerfahrten) sowie einen Bewusstseinswandel hin zu verstärkter Kooperation in der Logistikbranche.

Der stärkere Einsatz intelligenter Telematik und Datenaustausch kann im optimistischen Fall etwa 1 Mio. t THG einsparen, hauptsächlich im Fernverkehr. Während die vorgenannten Maßnahmen langfristig noch deutlich höhere Potentiale haben als für das Jahr 2030 abgeschätzt, ist bei der intelligenten Telematik das erzielbare Potential technisch auf etwa 1,5 Mio. t THG begrenzt und dürfte im Zuge der fortschreitenden Elektrifizierung der Antriebe auch eher abnehmen.

Mit bis zu 2 Mio. t erhebliches THG-Minderungspotential birgt das „Slow Steaming“ bei Seeschiffen. Hier bestehen zwar keine nennenswerten technischen Umsetzungshürden, allerdings auch nur geringe Möglichkeiten staatlicher Einflussnahme – die Geschwindigkeit ihrer Frachtschiffe wird durch die Reedereien aufgrund wirtschaftlicher Erwägungen in einem internationalen Transportmarkt festgelegt.

Die Maßnahmen „Optimierte Frachtrouten“ und „Paketlieferung per E-Lastenrad“ zielen auf die urbane Logistik, die in puncto Transportleistung und daher auch bei den THG-Emissionen eine vergleichsweise geringe Rolle spielt. Erstere Maßnahme weist zudem ein geringes spezifisches

Einsparpotential auf, letztere Maßnahme wirkt ausschließlich im KEP-Segment. Die THG-Einsparpotentiale dieser Maßnahmen sind daher vergleichsweise gering. Da sich eine Senkung der Retourenquote ebenfalls ausschließlich im KEP-Segment niederschlägt (wenn hier auch zusätzlich Fernverkehre reduziert werden können), ist auch bei dieser Maßnahme das Wirkpotential vergleichsweise begrenzt.

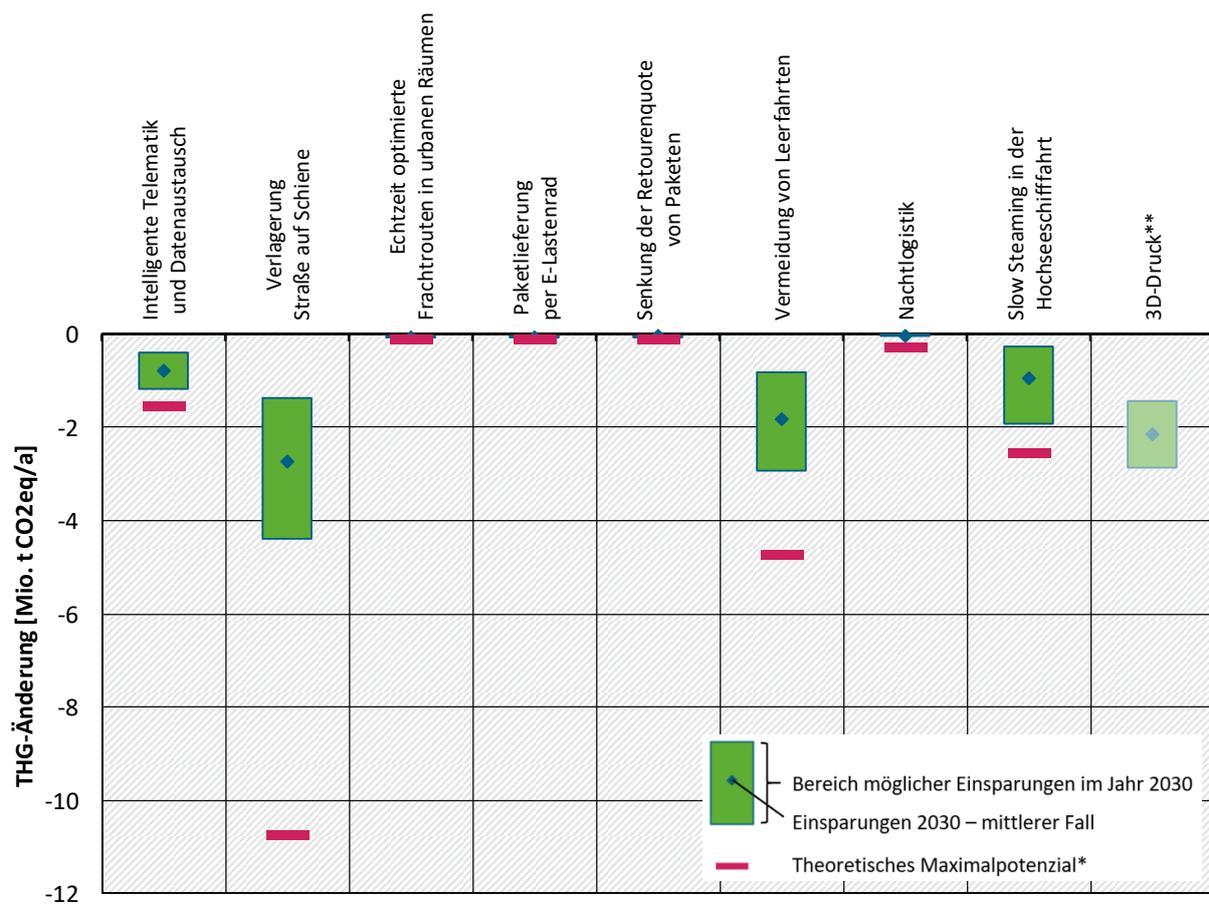
Eine Sonderstellung nimmt die Maßnahme „3D-Druck“ ein. Hier konnten nur die transportseitigen Wirkungen quantifiziert werden, es ist jedoch auch mit signifikanten Emissionsänderungen im Bereich Produktion zu rechnen. Die angegebenen Wirkungen sind daher als erste Indikation für den Transportsektor zu sehen. In der Praxis ist damit zu rechnen, dass Mehremissionen bei der Produktion mittels 3D-Druckern die Einsparungen mindestens teilweise kompensieren. Außerdem ist anzumerken, dass der Umfang der Einsatzfelder und die entsprechende Verlagerung der konventionellen Produktion auf 3D-Druck noch unklar ist.

In den nachfolgenden Abschnitten sind die einzelnen Maßnahmen und die jeweils getroffenen Annahmen näher beschrieben. Hier werden zudem jeweils die Bandbreiten der absoluten sowie relativen²¹ THG- und NO_x-Minderungspotenziale angegeben.

Abbildung 37: THG-Vermeidung – Prozessoptimierung

THG Vermeidung WTW

Mio. t CO₂eq pro Jahr



Quellen: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkung: *Beim theoretischen Maximalpotenzial werden die Emissionsfaktoren und Verkehrsmengen des Jahres 2030 herangezogen. **Beim 3D-Druck sind lediglich die möglichen Auswirkungen auf den

²¹ Bezogen werden die relativen Einsparpotenziale auf die gesamten bilanzierten Emissionen, siehe Abschnitt 4.2.

Transport und nicht auf die Produktion bilanziert. Die aus der Produktion resultierenden Emissionen könnten bei dezentralen Druckvorgängen höher sein als die zentrale Produktion zzgl. Lieferung.

Intelligente Telematik und Datenaustausch

Die vorliegende Maßnahme umfasst die Implementierung verschiedener Technologien bzw. technischer Vorgaben, die zu einem effizienteren Fahrprofil von Lkw führen können:

- ▶ Erweiterte Fahrerassistenzsysteme: Hierzu zählen neben intelligenten Routingsystemen auch erweiterte Fahrerassistenzsysteme (inkl. Fahrertrainings), die explizit auf Kraftstoffeinsparung abzielen.
- ▶ Reduzierte Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen (mithin infolge von Fahrertrainings und des Einsatzes von vorausschauenden Tempomaten).
- ▶ Intelligent Transport Systems (ITS), d. h. die Kommunikation zwischen verschiedenen Fahrzeugen (V2V) sowie zwischen Fahrzeug und der Infrastruktur (V2I). Besondere Beachtung findet das Platooning, welches eine halbautomatisch fahrende Fahrzeugkolonne beschreibt. Sie wird zentral koordiniert und die Fahrzeuge folgen dicht hintereinander, was zu einem aerodynamischen Vorteil führt.

Tabelle 31 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme „Intelligente Telematik und Datenaustausch“ und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Maßnahme rangiert gemessen an ihrem Emissionseinsparpotenzial im Mittelfeld aller Maßnahmen. Die Bandbreite der Ergebnisse ist ausschließlich getrieben durch die Annahme zur Durchdringung der Maßnahme in der Fahrzeugflotte (Standardwerte: 25 %, 50 % und 75 % der Verkehrsleistung).

Die intelligente Telematik ist ein schon lange diskutiertes Konzept in der Logistik und findet bereits in verschiedenen Aspekten Anwendung. Dies stellte sich als Herausforderung zur Abschätzung der Baseline dar, da keine Daten ermittelt werden konnten, inwiefern die Technologien schon in der Praxis zum Einsatz kommen. So sind intelligente Routingsysteme schon nahezu vollständig in der Branche etabliert, andere Systeme stehen noch am Anfang wie z. B. das Platooning. Außerdem kommen stetig neue Technologien aus dem Bereich der intelligenten Telematik auf den Markt, sodass der Umsetzungsgrad als dynamische Größe anzusehen ist. Der Aspekt „Vermeidung von Leerfahrten“ wird häufig als Zielgröße von intelligenter Telematik genannt. Da es sich hierbei um einen relevanten Ansatzpunkt für die Logistik handelt, wird diese Maßnahme gesondert betrachtet.

Tabelle 31: Prozessoptimierung: Intelligente Telematik und Datenaustausch

Intelligente Telematik und Datenaustausch	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Intelligente Telematik [47] Routenplaner [51], [52] Intelligentes Ladungssystem „Fleetboard“ [53]
Datenquellen	IRU (2017): Commercial Vehicle of the Future: A roadmap towards fully sustainable truck operations. Transport & Mobility Leuven, Leuven.
Datenqualität	gut
Spezifische Wirkung	Schwere Nutzfahrzeuge: Reduktion der CO ₂ -Emissionen um 9 % im Güterstraßenverkehr bis 2030 auf der Langstrecke (6 % Erweiterte Fahrerassistenzsysteme, 2 % Reduzierte Höchstgeschwindigkeit und 1% ITS)
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: alle. Straßenverkehr: alle SNF, Distanzklassen >150 km, national & international.
Annahmen für Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Es besteht Unsicherheit, in welchem Umfang die Maßnahme momentan bereits zum Einsatz kommt. Ein momentaner Umsetzungsgrad von kleiner 25 % der Verkehrsleistung wird als realistisch angesehen. <u>Szenario Min</u> : 9 % Effizienzverbesserung bei 25 % der Verkehrsleistung. <u>Szenario Mittel</u> : 9 % Effizienzverbesserung bei 50 % der Verkehrsleistung. <u>Szenario Max</u> : 9 % Effizienzverbesserung bei 75 % der Verkehrsleistung. <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : 9 % Eff.-Verb. bei 100 % der Verkehrsleistung.

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Max-Potenzial²</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-387	-774	-1.161	-1.549 (-1,39 %)
NO_x – TTW¹ [t/a]	-81	-162	-244	-325 (-0,14 %)

Anmerkung: ¹Verbesserungen bei NO_x-Emissionen werden über TREMOD abgeschätzt. Ein Vergleich zwischen Verbräuchen und Emissionen bei Leerfahrten und voller Beladung zeigt, dass 68 % Mehrverbrauch pro Fzkm entsteht, aber nur 12 % mehr NO_x-Emissionen. Daher wird die prozentuale Verbesserung bei NO_x-Emissionen mit nur 17 % (=12%/68 %) der Verbrauchsverbesserungen angenommen. ²Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Verlagerung Straße auf Schiene

Der Maßnahmenkomplex umfasst Aktivitäten, die zu einer deutlichen Verlagerung des Straßengüterverkehrs hin zum Schienengüter führen. Dies soll mit Investitionen in die Infrastruktur, einer umfassenden Digitalisierung und Vernetzung der einzelnen Logistikakteure erfolgen.

Im Einzelnen werden die Annahmen gemäß DLR et al. (2016) und Bergk et al. (2021) getroffen. Tabelle 32 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung dieses Maßnahmenkomplexes und die Bilanzierungsergebnisse zusammen. Der Maßnahmenkomplex erreicht in seiner maximalen Ausprägung ein THG-Minderungspotential von über 4 Mio. t CO_{2eq} pro Jahr, dies ist der höchste Wert aller hier betrachteten Maßnahmen. Dies liegt auch daran, dass es sich hier um ein umfassendes Maßnahmenbündel handelt, das mit zum Teil „kleineren“ Einzelmaßnahmen verglichen wird.

Die Bandbreite der Ergebnisse setzt auf den Szenarien „Forcierte Infrastrukturpolitik“ (DLR et al., 2016) und dem „Zielszenario“ (Bergk et al., 2021) auf. Das theoretische Maximalpotenzial bildet das Szenario „vom KV zur Multimodalität“ (DLR et al., 2016) ab und zeigt nochmal einen deutlichen Sprung, was der eigentlichen Umsetzung des Konzepts der Multimodalität entspricht. Das minimale Szenario ist demnach eher als vorbereitende Maßnahme hin zu einer Multimodalität zu betrachten.

Insgesamt ist anzumerken, dass Infrastrukturmaßnahmen sehr lange Vorläufe benötigen und ihre Umsetzung in der Praxis sehr langwierig ist. Die meisten enthaltenen Einzelmaßnahmen lassen sich nicht realistisch über den hier betrachteten Zeitraum bis 2030 verwirklichen. Blechschmidt et al. (2022) haben in ihrer Studie „Handlungsoptionen für eine ökologische Gestaltung der Transportmittelwahl im Güterfernverkehr“ herausgearbeitet, dass auf Verkehrsrelationen mit einer guten Schieneninfrastruktur der Schienengüterverkehr bereits heute hohe Anteile hat. Dies trifft jedoch nur auf einen kleinen Teil der Relationen zu: Lediglich für ca. 20 % der Verkehrsrelationen wurde für die heutige Situation eine existierende Wahlmöglichkeit (d. h. Konkurrenzsituation) zwischen den Verkehrsträgern konstatiert. Auf diesen Relationen hat die Schiene mit 43 % der Transportleistung auch bereits einen vergleichsweise hohen Anteil. Um darüberhinausgehende Potentiale zu heben, müssen Verkehrsträgerkonkurrenzen relationsscharf entwickelt werden. Dafür wird ein Gesamtkonzept benötigt, welches neben infrastrukturellen Maßnahmen auch neue Technologien am Rollmaterial forciert und die Digitalisierung nutzt, um die Kapazität der Infrastruktur besser auszunutzen (bei der Bahn insbesondere Blockverdichtung). Die Voraussetzungen für die Hebung des in diesem Maßnahmenkomplex beschriebenen Potenzials sind vor diesem Hintergrund kaum gegeben, weshalb die Potenzialabschätzung hier einen stark theoretischen Charakter hat.

In der zugrundeliegenden Studie wird von Multimodalität gesprochen. Ein noch tiefergehendes Konzept umfasst die Synchromodalität, die eine umfassendere und tiefere Digitalisierung und Vernetzung voraussetzt. Die Maßnahme „Langzug 740mPlus“ wird als Teilmaßnahme des Szenarios „Forcierte Infrastrukturpolitik“ (hier Szenario Min) aufgeführt. Diese Maßnahme wird nochmal gesondert betrachtet.

Tabelle 32: Prozessoptimierung: Verlagerung Straße auf Schiene

Verlagerung Straße auf Schiene	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Synchromodalität [48] Verlagerung von Straße auf Schiene [35] Optimierung Kombiniertes Verkehr: Straße Schiene Schiff [36] Langzug 740mPlus [9]
Datenquellen	DLR; ifeu; LBST; DBFZ (2016): Verkehrsverlagerungspotenzial auf den Schienengüterverkehr in Deutschland, Berlin. Europäische Kommission (2011): WEISSBUCH Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. KOM/2011/0144 endg. Brüssel. Bergk, F.; Dünnebeil, F.; Greinus, A.; Ickert, L.; Peter, M. (2021): Klimaschutzbeitrag alternativer Verkehrsträger – Potenziale und Anforderungen. ifeu, INFRAS, Heidelberg, Berlin, Zürich.
Datenqualität	Sehr gut
Spezifische Wirkung	Es werden Ergebnisse der Studie (DLR et al., 2016) und (Bergk et al., 2021) genutzt, die bereits eine deutschlandweite Potentialbetrachtung mittels integrierter Modellierung vornimmt. Dementsprechend wird für diese Maßnahme keine spezifische Wirkung angegeben werden.
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: „Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft sowie der Fischerei“, „Nahrungs- und Genussmittel“, „Textilien und Bekleidung; Leder und Lederwaren“, „Holzwaren, Papier, Pappe Druckerzeugnisse“, „Chemische Erzeugnisse etc.“, „Metalle und Metallerzeugnisse“, „Maschinen und Ausrüstungen, Haushaltsgeräte etc.“, „Fahrzeuge“, „Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte etc.“, „Sammelgut“, „Gutart unbekannt“ und „Sonstige Güter“. Straßenverkehr: alle SNF, alle Distanzklassen. Internationale Verkehre sind im Szenario Min nicht berücksichtigt, da in diesem Segment umfangreiche Investitionen nur Sinn ergeben, wenn sie in einen einheitlichen europäischen Verkehrsraum eingebettet sind.
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Die Voraussetzungen zur Erfüllung der Szenariendefinition sind in der Praxis bisher kaum umgesetzt. <u>Szenario Min</u> : "Forcierte Infrastrukturpolitik" Verlagerung von 15 Mrd. tkm (DLR et al., 2016). <u>Szenario Mittel</u> : Mittelwert aus Min- und Max-Szenario. <u>Szenario Max</u> : Verlagerung von 61 Mrd. tkm (Bergk et al., 2021). <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : "vom KV zur Multimodalität" Verlagerung von 149 Mrd. tkm (DLR et al., 2016).

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-1.373	-2.739	-4.397	-10.739 (-9,67 %)
NO_x – TTW [t/a]	-1.941	-3.747	-6.015	-14.693 (-6,16 %)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Echtzeit optimierte Frachtrouten in urbanen Räumen

Die Maßnahme umfasst die Regulierung und konkrete Ausweisung von urbanen Frachtrouten für den Warentransport. Mithilfe von IT und Echtzeitwerten kann die Routenführung zusätzlich deutlich verbessert werden. Das Ergebnis ist eine effizientere Warenlieferung. Tabelle 33 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Maßnahme hat gemessen an ihrem grundsätzlichen Treibhausgaseinsparpotenzial vergleichsweise geringe Auswirkungen, da nur der Schwerlastverkehr für den urbanen Raum (Distanzklassen <50 km) adressiert ist. Primäre Motivation der Maßnahme ist allerdings die Verbesserung der Luftqualität und die Reduktion des Flächenverbrauchs durch den Straßengüterverkehr im urbanen Raum. Die Bandbreite der Ergebnisse ist ausschließlich getrieben durch die Annahme zur Durchdringung der Maßnahme im urbanen Raum (Standardwerte: 25 %, 50 % und 75 % der Verkehrsleistung). Die Maßnahme steht im Zusammenhang mit dem Konzept zu Intelligent Transport System (ITS). Sie ist jedoch in dieser Betrachtung nur auf den urbanen Kontext beschränkt.

Tabelle 33: Prozessoptimierung: Echtzeit optimierte Frachtrouten in urbanen Räumen

Echtzeit optimierte Frachtrouten in urbanen Räumen	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Routenoptimierung in Echtzeit [52] Steuerung von Frachtrouten (durch Digitalisierung) [51]
Datenquellen	IRU (2017): Commercial Vehicle of the Future: A roadmap towards fully sustainable truck operations. Transport & Mobility Leuven, Leuven.
Datenqualität	gut
Spezifische Wirkung	Reduktion der CO ₂ -Emissionen um 2,5 % bis 2030 bei schweren Nutzfahrzeugen (IRU, 2017)
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: alle. Straßenverkehr: alle SNF, Distanzklassen <50 km. Internationale Verkehre nur in Szenario Theoretisches Maximalpotenzial berücksichtigt.
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Aufgrund ihrer hohen Voraussetzungen in puncto Digitalisierung kann der aktuelle Umsetzungsgrad als vernachlässigbar angenommen werden. <u>Szenario Min</u> : 25 % der Verkehrsleistung <u>Szenario Mittel</u> : 50 % der Verkehrsleistung <u>Szenario Max</u> : 75 % der Verkehrsleistung <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : 100% der Verkehrsleistung

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Max-Potenzial²</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-28	-55	-83	-111 (-0,10 %)
NO_x – TTW¹ [t/a]	-8	-15	-23	-30 (-0,01 %)

Anmerkung: ¹Verbesserungen bei NO_x-Emissionen werden über TREMOD abgeschätzt. Ein Vergleich zwischen Verbräuchen und Emissionen bei Leerfahrten und voller Beladung zeigt, dass 68 % Mehrverbrauch pro Fzkm entsteht, aber nur 12 % mehr NO_x-Emissionen. Daher wird die prozentuale Verbesserung bei NO_x-Emissionen mit nur 17 % (=12%/68 %) der Verbrauchsverbesserungen angenommen. ²Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Paketlieferung per E-Lastenrad

Die Maßnahme beschreibt die Nutzung von Lastenrädern zur Verteilung von Paketen im urbanen Raum an Stelle der klassischen dieselbetriebenen leichten Nutzfahrzeuge. Tabelle 34 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Maßnahme hat gemessen an ihren THG-Emissionen ein vergleichsweise geringes Wirkpotential, da damit nur ein Teil des Güterverkehrs (LNF und SNF <26t) für den urbanen Raum (Distanzklassen <50 km) für die Güterabteilung „Post, Pakete“ adressiert wird. Sie ist als Teil einer Transformation der urbanen Logistik zu sehen, die neben dem Klimaschutz vor allem eine Verbesserung der Luftqualität und bessere Flächennutzung verfolgt. Die Bandbreite der Ergebnisse ist bestimmt durch den angenommenen Anteil der per Lastenrad durchgeführten KEP-Touren. Zu berücksichtigen ist, dass zur Versorgung der städtischen Mikrodepots zusätzliche Fahrten mit schweren Nutzfahrzeugen erforderlich sind, die bei der Berechnung berücksichtigt werden.

Tabelle 34: Prozessoptimierung: Paketlieferung per E-Lastenrad

Paketlieferung per E-Lastenrad	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Transport via E-Bike [30] Lastenräder [31]
Datenquellen	Allekotte, M.; Bergk, F.; Biemann, K.; Deregowski, C.; Knörr, W.; Althaus, H.-J.; Sutter, D.; Bergmann, T. (2019): Ökologische Bewertung von Verkehrsarten. ifeu, Öko-Institut, Infras, im Auftrag des UBA, Heidelberg, Berlin, Zürich.
Datenqualität	Sehr gut
Spezifische Wirkung	Statt LNF werden für die letzte Meile Lastenräder eingesetzt. SNF werden nun zusätzlich benötigt, um die Pakete zum Mikrodepot in die Innenstadt zu bringen. Auf der letzten Meile können durch das Lastenradkonzept mit Mikrodepot die THG-Emissionen pro Paket um 60-70% reduziert werden.
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: „Post, Pakete“. Straßenverkehr: LNF, SNF >26t, Distanzklasse <50km. Internationaler Verkehr ist nicht beeinflusst.
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Aktuell gibt es Pilotprojekte. Ein umfassender Einsatz von Lastenrädern im KEP-Bereich ist aktuell nicht gegeben. Im Referenzszenario ist kein Einsatz von Lastenrädern angenommen. Verlagerung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen auf das Lastenrad: <u>Szenario Min</u> : -176 Mio. Fzg-km (LNF); +7,0 Mio. Fzg-km (SNF). <u>Szenario Mittel</u> : -296 Mio. Fzg-km (LNF); +17,5 Mio. Fzg-km (SNF). <u>Szenario Max</u> : -422 Mio. Fzg-km (LNF); +28,5 Mio. Fzg-km (SNF). <u>Szenario Theoretisches Maximalpotenzial</u> : -729 Mio. Fzg-km (LNF); +89,3 Mio. Fzg-km (SNF).

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-39	-60	-83	-108 (-0,10 %)
NO_x – TTW [t/a]	-46	-70	-96	-124 (-0,05 %)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Senkung der Retourenquote von Paketen

Die Entwicklung des Sendungsvolumens der KEP folgt einer sehr dynamischen Entwicklung. Seit 2011 legt die Anzahl der Sendungen pro Jahr im Schnitt um 6,2 % zu (gesamte Zunahme seitdem: 82 %). 2021 war das Wachstum mit 11,2 % bereits fast doppelt so groß (BIEK, 2022). Dies zeigt sich auch deutlich in der Zunahme an Lieferverkehren zu den privaten Haushalten (B2C). Dieses Wachstum wird vor allem dem stark wachsenden Onlinehandel zugeschrieben. Damit ist auch eine hohe Anzahl von Retouren verbunden, insbesondere im Bekleidungsbereich mit ca. 40 % (Asdecker, 2022). Die Maßnahme zielt darauf ab, die Retouren von Paketen in der „Kurier-, Express- und Paketdienst“ (KEP) Branche zu reduzieren.

Tabelle 35 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Für die Wirkungsabschätzung wird angenommen, dass die Hälfte der Retouren vermieden werden kann (entspricht 4,6 % des KEP-Transportvolumens). Im konservativen Fall (Min) führt dies zu einer verringerten Fahrzeugauslastung bei gleicher Fahrleistung, im optimistischen Fall (Max) geht die Fahrleistung proportional zur Transportleistung zurück.

Die Maßnahme hat gemessen an ihren THG-Emissionen ein vergleichsweise geringes Wirkpotential, da nur die Güterklasse „Post, Pakete“ adressiert wird. Durch regulatorische Anpassungen mit dem Ziel einer zumindest teilweisen Kostenweitergabe der Retouren an die Verbraucher könnten hier Potentiale aber vermutlich vergleichsweise einfach und schnell gehoben werden. Zudem können digitale Innovationen helfen, beispielsweise die benötigte Größe beim Kleidungskauf zuverlässiger im Voraus zu bestimmen. Auch vor dem Hintergrund der weiterhin hohen Wachstumserwartungen im Online-Handel sollte eine Reduktion der Retouren prioritär verfolgt werden.

Tabelle 35: Prozessoptimierung: Senkung der Retourenquote von Paketen

Senkung der Retourenquote von Paketen	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	<i>Keine passende Maßnahme in der Longlist</i>
Datenquellen	BIEK (2022): KEP-Studie 2021 – Analyse des Marktes in Deutschland. Bundesverbandes Paket und Expresslogistik e. V., Köln. Asdecker, B. (2022): Uni Bamberg Forschungsgruppe Retourenmanagement.
Datenqualität	befriedigend
Spezifische Wirkung	Reduktion der Auslastung und/ oder der Fahrleistung aufgrund des niedrigeren Paketaufkommens.
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: „Post, Pakete“. Straßenverkehr: alle SNF und LNF, alle Distanzklassen. Internationalen Verkehr werden nicht miteinbezogen.
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Es besteht Unsicherheit, in welchem Umfang die Maßnahme momentan bereits zum Einsatz kommt. Aktuell beträgt der Retourenanteil 9,1 % der Pakete (Asdecker, 2022; BIEK, 2022). Eigene Annahme: Die Hälfte der Retouren wird vermieden. <u>Szenario Min</u> : Die Reduktion des Aufkommens bewirkt eine Reduktion der Auslastung (-4,6 %) bei konstanter Fahrleistung. <u>Szenario Mittel</u> : Die Reduktion des Aufkommens bewirkt eine Reduktion der Auslastung und der Fahrleistung (Fahrten <50 km: -4,6 % Auslastungsänderung; Fahrten >50 km: - 2,3 % Auslastungsänderung und -2,3 % Fahrleistungsänderung. <u>Szenario Max</u> : Die Reduktion des Aufkommens bewirkt eine proportionale Reduktion der Fahrleistung (-4,6 %) bei konstanter Auslastung. <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : Alle Retouren werden vermieden. Die Reduktion des Aufkommens bewirkt eine proportionale Reduktion der Fahrleistung (-9,1 %) bei konstanter Auslastung.

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-24	-33	-57	-114 (-0,10 %)
NO_x – TTW [t/a]	-41	-53	-71	-142 (-0,06 %)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Vermeidung von Leerfahrten

Die Maßnahme bildet die Effizienzsteigerung im Lkw-Verkehr durch Vermeidung von Leerfahrten ab, die heute in Deutschland noch 22 % an der gesamten Straßengüterverkehrsleistung ausmachen. Deutschland bewegt sich damit im europäischen Vergleich bezüglich des Leerfahrtenanteils im Mittelfeld (vgl. Abbildung 36). In den letzten Jahren ist der Anteil der Leerfahrten in Deutschland leicht gestiegen (2010: 20 %, 2015: 21 %).

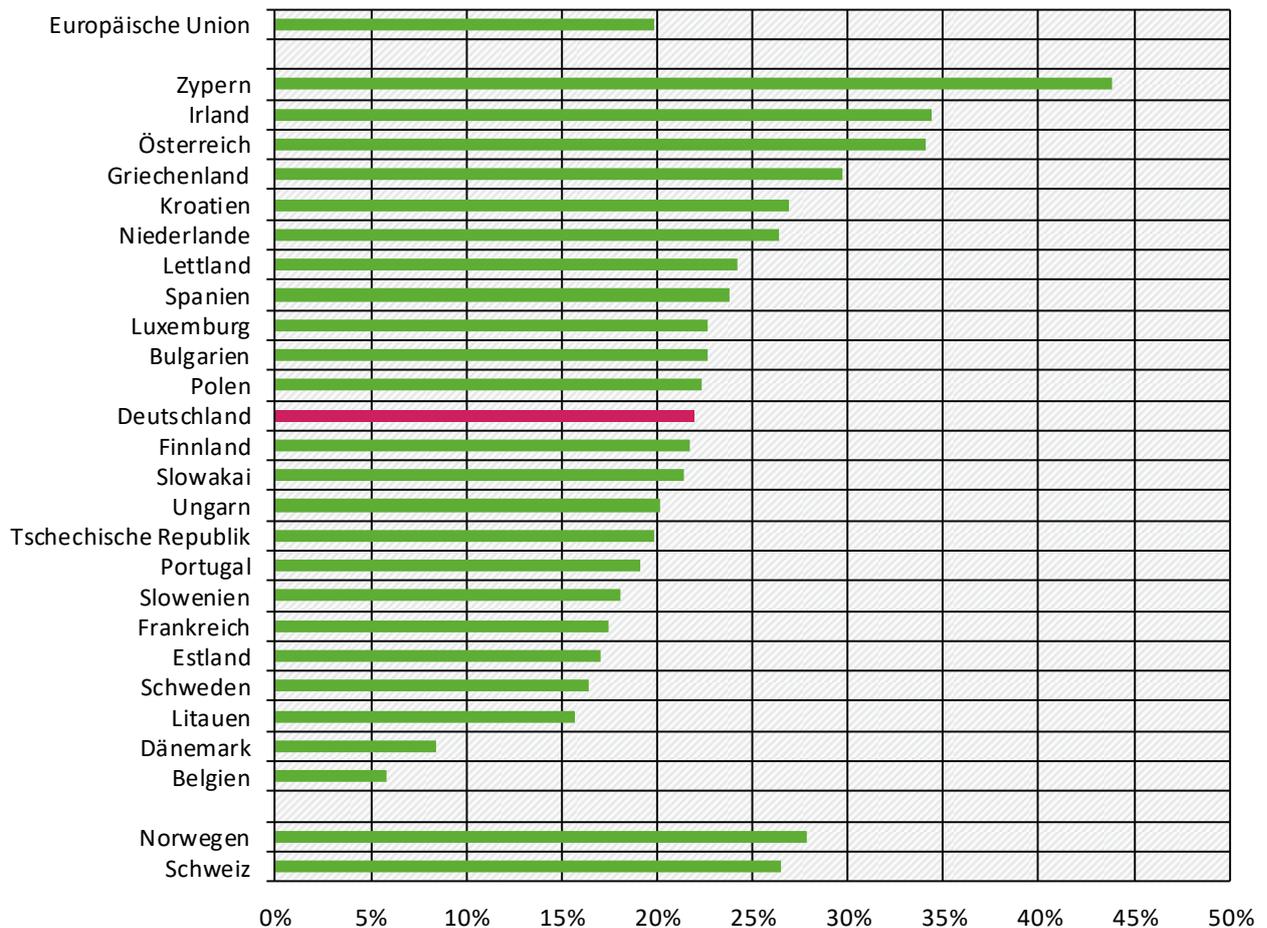
Die Gründe für den hohen Leerfahrtenanteil sind vielschichtig. Zum einen ist ein gewisser Leerfahrtenanteil strukturell bedingt, da z. B. Ballungsräume mehr Güter verbrauchen, als sie produzieren. Auch bei der Distribution im Nah- und Regionalbereich, insbesondere an Endverbraucher, lassen sich Leerfahrten prinzipiell nicht vermeiden. Hier geht es vor allem um die Optimierung der Fahrzeugauslastung. Auch technische Anforderungen an den Transport, wie z. B. ein bestimmter Aufliegertyp, haben oftmals Einfluss auf die Möglichkeit, ein Fahrzeug für Rückladungen zu nutzen. So können bspw. Leerfahrten bei Tank- und Silotransporten kaum vermieden werden.

Ungeachtet dessen gibt es aber eine Reihe technischer, organisatorischer und wirtschaftlicher Gründe dafür, dass prinzipiell vermeidbare Leerfahrten bisweilen in Kauf genommen werden. Dazu zählen auf der einen Seite eine häufige wettbewerbsbedingte Zurückhaltung bei der Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Logistikern, die kleinteilige Struktur der Transportbranche Kundenansprüche sowie die in Deutschland im internationalen Vergleich eher schleppende Digitalisierung.

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Auslastung stellen technisch-organisatorische Maßnahmen wie beispielsweise die verstärkte Nutzung von Frachtenbörsen dar. Daneben haben auch regulatorische Anpassungen Potential zur Verringerung der Leerfahrten. Es ist anzumerken, dass eine substanzielle Verringerung des Leerfahrtenanteils eine Neuausrichtung grundlegender Logistikprozesse und flexiblere Organisationsstrukturen erfordert.

Abbildung 38: Leerfahrten im Straßengüterverkehr im europäischen Vergleich 2020

Anteil an Fahrzeugkilometern



Quelle: eurostat (2021). Anmerkungen: Malta: Daten nicht enthalten. Italien und Rumänien: Es sind keine Fahrzeugkilometer für Leerfahrten verfügbar.

Tabelle 36 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme „Vermeidung von Leerfahrten“ und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Maßnahme hat ein vergleichsweise hohes Treibhausgaseinsparpotenzial, was die Relevanz der Maßnahme verdeutlicht. Die Bandbreite der Ergebnisse orientiert sich an den geringeren Leerfahrtenanteilen für die Nachbarländer Frankreich (Szenario Min) und Belgien (Szenario Max). Diese Werte werden nur für schwere Lkw (>26t) auf Langstrecken angesetzt, da sich die Bewertung lediglich auf Transporte mit konventionellen Aufliegern bezieht. Für die restlichen Transporte wird von einem geringeren Potenzial ausgegangen (nur die halbe Leerfahrtenreduktion im Vergleich zur Annahme bei Langstrecken-Lkw). Hierdurch wird der deutlich größeren Herausforderung Rechnung getragen, für Fahrzeuge mit besonderen Aufbauten Rückladungen zu organisieren. An dieser Stelle ist zu betonen, dass die Logistikstruktur sich in anderen Ländern zum Teil wesentlich von der deutschen unterscheidet und somit auch die Rahmenbedingungen für die Vermeidung von Leerfahrten.

Tabelle 36: Prozessoptimierung: Vermeidung von Leerfahrten

Vermeidung von Leerfahrten	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Maßnahmen, die drauf abzielen Leerfahrten zu verringern Kooperationen von Unternehmen, gemeinsame Lager zentrale Organisation von Transporten im Unternehmen [46] Intelligente Telematik [47] Open warehouses and transport networks Längere Transportzeiten ermöglichen Backloading Begegnungsverkehre / Vermeidung von Leerfahrten
Datenquellen	Eurostat (2021): A fifth of road freight kilometres by empty vehicles. Dörfelt, S.; Scherf, J. (2018): Leerkilometer und Leerfahrten - Wie man sie reduziert und vermeidet.
Datenqualität	gut
Spezifische Wirkung	Die Verringerung des Leerkilometeranteils um 1 % in Deutschland führt zu einer Einsparung von 300 Mio. Fahrzeugkilometern (eurostat, 2021).
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: alle. Straßenverkehr: alle SNF, alle Distanzklassen. Beeinflusst nationale und internationale Verkehre.
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Aktueller Stand der Leerfahrtenstatistik (2021). Potentialannahmen orientieren sich an einem Ländervergleich auf Grundlage der europäischen Güterverkehrsstatistik (eurostat, 2021): <u>Szenario Min</u> : 17 % Leerkilometer, orientiert an Daten für Frankreich. <u>Szenario Mittel</u> : 12 % Leerkilometer, Mittelwert der Szenarien Min und Max. <u>Szenario Max</u> : 6 % Leerkilometer, orientiert an bestem europäischen Wert (Belgien). <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : 0 % Leerkilometer ²² .

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-829	-1.827	-2.931	-4.744 (-4,27 %)
NO_x – TTW [t/a]	-793	-1.759	-2.843	-5.695 (-2,39 %)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

²² Aufgrund asymmetrischer Transportströme ist das theoretische Maximalpotential hier in besonderem Maße als rein theoretischer Referenzpunkt zu verstehen, der in der Praxis für die Gesamtheit des Straßengüterverkehrs unter keinen Umständen erreicht werden kann.

Nachtlogistik

Diese Maßnahme bildet den Einsatz elektrischer Fahrzeuge im Rahmen der leisen Nachtlogistik ab, deren Grundlagen im Abschnitt 2.2 beschrieben sind. Die Wirkung der Maßnahme resultiert zum einen aus der Emissionsminderung durch den Einsatz elektrischer Antriebe, zum anderen aus der Verbrauchsverbesserung durch flüssigeren Verkehr in der Nacht. Durch die nächtliche Zulieferung reduzieren sich zwar gleichzeitig die LKW-Fahrten am Tag und somit wird der gesamte Verkehr auch tagsüber flüssiger, jedoch wird dieser Effekt vernachlässigt, da deren Anteil am Gesamtverkehr zu gering ist.

Tabelle 37 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Da die Maßnahme sehr spezifisch auf den Schwerlastverkehr im urbanen Raum (Distanzklassen <50 km) und wenige Gütergruppen abzielt, ist das Emissionsreduktionspotential vergleichsweise gering. Wichtig sind allerdings die Zusatznutzen der Maßnahme: Zum einen können die urbane Lebensqualität mindernde Spitzen im Verkehrsaufkommen reduziert werden, zum anderen stellen die betrieblichen Vorteile der Nachtlogistik ihrerseits einen Anreiz für den Einsatz elektrischer Fahrzeuge dar. Die Bandbreite der Ergebnisse orientiert sich zum einen an der Kraftstoffeinsparung (10 % bis 15 %), dem Anteil an der Verkehrsleistung (8 % bis 12 %) und der Steigerungsrate des Elektro-Anteils (8 % bis 21 %).

Tabelle 37: Prozessoptimierung: Nachtlogistik

Nachtlogistik	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	E-Lkw für Nachtlogistik [28] Lieferung außerhalb von Stoßzeiten [29]
Datenquellen	Verbrauchsverbesserung: Eigene Berechnung durch ifeu anhand des HBEFA 4.1. Anteil potenzieller Verlagerung auf Nachtlogistik an den Güterabteilungen: Eigene Berechnung durch IML.
Datenqualität	Sehr gut
Spezifische Wirkung	Verbrauchsverbesserung von 10-15 % durch flüssigeren Verkehr in der Nacht. Steigerung der Anteile mit batterieelektrischem Antrieb an der Fahrleistung aller SNF für Entfernungen <50 km im Bereich von 8-21 %.
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: „Nahrungs- und Genussmittel“ und „Textilien und Bekleidung; Leder und Lederwaren“ zu 10 % (min), 25 % (max), 75 % (theor. Max-Pot.), „Maschinen und Ausrüstungen, Haushaltsgeräte etc.“ und „Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte etc.“ zu 0 % (min), 10 % (max), 50 % (theor. Max-Pot.), „Post, Pakete“ und „Sammelgut“ zu 10 % (min), 25 % (max), 50 % (theor. Max-Pot.). Straßenverkehr: alle SNF, Distanzklasse <50 km. Beeinflusst keine internationalen Verkehre.
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Die Zustellung in der Nacht ist bereits heute ein verbreitetes Logistikkonzept, allerdings fast ausschließlich mit konventionellen Fahrzeugen. Eigene Annahmen für alle schweren Nutzfahrzeuge (Distanzklassen kleiner 50 km): <u>Szenario Min</u> : 10 % Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs bei 8 % Anteil an der Verkehrsleistung; Steigerung Elektroanteil: 8 %-Pkt. <u>Szenario Mittel</u> : 12 % Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs bei 15 % Anteil an der Verkehrsleistung; Steigerung Elektroanteil: 14 %-Pkt. <u>Szenario Max</u> : 15 % Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs bei 12 % Anteil an der Verkehrsleistung; Steigerung Elektroanteil: 21 %-Pkt. <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : 15 % Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs bei 100 % Anteil an der Verkehrsleistung; Steigerung Elektroanteil: 92 %-Pkt.

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-12	-27	-45	-265 (-0,24 %)
NO_x – TTW [t/a]	-60	-112	-163	-477 (-0,20 %)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Slow Steaming in der Hochseeschifffahrt

Bei einer Verringerung der Geschwindigkeiten von Seeschiffen verbrauchen die Motoren weniger Kraftstoff und die CO₂-Emissionen werden reduziert. Dabei gilt, dass die benötigte Antriebsleistung eines Schiffes in etwa proportional zur dritten Potenz der Geschwindigkeit ist. Das bedeutet, dass eine Verringerung der Geschwindigkeit um 10 % den Energiebedarf um etwa 27 % reduziert. Da Schiffe weniger Strecke pro Zeiteinheit zurücklegen, wenn sie langsamer werden, beträgt die Verringerung des Energiebedarfs pro Streckeneinheit in diesem Beispiel 19 %, der Energiebedarf ist also in etwa proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit (Faber et al., 2017). In der Studie werden die CO₂-Einsparungen noch an weitere Rahmenbedingungen angepasst, sodass sich eine Reduktion von 13 % in der Flotte bei einer Geschwindigkeitsreduktion von 10 % einstellt. Die regulären Durchschnittsgeschwindigkeiten reichen von ca. 12 Knoten (Schüttgutfrachter und Tanker) bis 15 Knoten (Containerschiffe) (Faber et al., 2020).

Da für Geschwindigkeitsreduktionen von Hochseeschiffen keine technischen Veränderungen notwendig sind, gilt diese Maßnahme als kurzfristig in der Breite umsetzbar. Die Vorteile von Slow Steaming variieren für verschiedene Schiffstypen, Größen und Frachtrouten.

Tabelle 38 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Bandbreite der Ergebnisse orientiert sich an einer Geschwindigkeitsreduktion von 10 %, 20 % und 30 %. Das würde für Containerschiffe eine Verlangsamung von 1,5 bis 3 Knoten im Durchschnitt bedeuten. Außerdem wurde für die verschiedenen Szenarien die Durchdringung in der Flotte mit den Standardwerten (25 %, 50 % und 75 %) für die Verkehrsleistung variiert.

Da durch Slow Steaming neben CO₂-Emissionen auch unmittelbar Betriebskosten bei den Reedereien eingespart werden, haben Krisen eine starke Auswirkung auf das Geschwindigkeitsverhalten der Seeflotte. Dies führt bei hohen Kraftstoffpreisen (z. B. Beginn Ukrainekrieg) oder verminderter Nachfrage (z. B. Finanzkrise 2008/9) zu hohen Geschwindigkeitsreduktionen ganz ohne Regulierung. In Zeiten von geringen Kraftstoffpreisen und großer Nachfrage (z. B. Sommer 2021) fahren die Containerschiffe wieder mit Höchstgeschwindigkeit, da Kapazitäten in Form von neuen Schiffen nur mit erheblichem Vorlauf aufgebaut werden können. Regulatorische Anpassungen könnten helfen, Slow Steaming als Klimaschutzmaßnahme zu verankern.

Tabelle 38: Prozessoptimierung: Slow Steaming in der Hochseeschifffahrt

Slow Steaming in der Hochseeschifffahrt	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Slow Steaming-Wirkung auf gesamte Flotte [12]
Datenquellen	Faber, J., Huigen, T., Nelissen, D. (2017): Regulating Speed: a short-term measure to reduce maritime GHG emissions. CS Delft, Delft.
Datenqualität	gut
Spezifische Wirkung	Bei einer Reduktion der Geschwindigkeit um 10 % werden 13 % der CO ₂ -Emissionen eingespart (20 % = 24 % und 30 % = 33 %) (Faber et al., 2017).
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: alle. Seeschifffahrt.
Potentialabschätzung	<p><u>Baseline</u>: Eine aktuelle Anwendung von Slow Steaming existiert bereits. Es besteht allerdings eine Unsicherheit, in welchem Umfang die Maßnahme momentan bereits zum Einsatz kommt.</p> <p>Reduktion der CO₂-Emissionen für Containerschiffe (Faber et al. 2017). Anteil der Verkehrsleistung (eigene Annahme):</p> <p><u>Szenario Min</u>: Geschwindigkeitsreduktion: 10 %; Reduktion 13 % CO₂-Emissionen für 25 % der Verkehrsleistung.</p> <p><u>Szenario Mittel</u>: Geschwindigkeitsreduktion: 20 %; Reduktion 24 % CO₂-Emissionen für 50 % der Verkehrsleistung.</p> <p><u>Szenario Max</u>: Geschwindigkeitsreduktion: 30 %; Reduktion 33 % CO₂-Emissionen für 75 % der Verkehrsleistung.</p> <p><u>Theoretisches Maximalpotenzial</u>: Geschwindigkeitsreduktion: 10 %; Reduktion 33 % CO₂-Emissionen für 100 % der Verkehrsleistung.</p>

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Max-Potenzial²</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-253	-934	-1.926	-2.567 (-2,31 %)
NO_x – TTW¹ [t/a]	-3.527	-12.902	-26.569	-35.425 (-14,9 %)

Anmerkung: ¹Änderungen der NO_x-Emissionen hergeleitet aus (Knudsen et al., 2022), (Faber et al., 2017), (Wiesmann, 2010) und (Rodrigue, 2022). ²Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

3D-Druck: Diskussion am Beispiel einer disruptiven Innovation mit Auswirkungen auf die Logistik

Die Technologie des 3D-Drucks ermöglicht für bestimmte Güter eine verbrauchsnähere Fertigung von Produkten oder Ersatzteilen. Dadurch können potenziell Transportwege und Transportvolumina reduziert werden. Es handelt sich um eine externe Innovation im Bereich der Industrie, die sich sekundär auf die Logistik auswirkt. Die Emissionen der Produktfertigung werden nicht bilanziert, sondern lediglich die Einsparungen beim Transport. Der Betrieb von heutigen 3D-Druckern ist gemessen an der Stückzahl noch sehr zeitaufwändig und energieintensiv. Da somit beim 3D-Druck gegenüber herkömmlichen Herstellungsverfahren mit höheren spezifischen Emissionen aus der Produktion zu rechnen ist, sind die hier berechneten Einsparungspotenziale als optimistisch anzusehen. Welche Bedeutung der 3D-Druck für die Logistik künftig entwickeln wird, ist heute noch nicht abzusehen.

Die Bandbreite der Ergebnisse²³ von 1,4 Mio. t CO_{2eq}/pro Jahr bis 2,9 Mio. t CO_{2eq}/pro Jahr ergibt sich aus einer angenommenen Spanne der spezifischen THG-Einsparungen zwischen 10 % und 20 % (ALICE, 2019). Das Ergebnis zeigt verhältnismäßig hohe potentielle Einsparungen, ohne Betrachtung der produktionsseitigen Auswirkungen auf die THG-Emissionen kann dies jedoch nur als eine Indikation der erwarteten Größenordnung für den Fall gesehen werden, dass die Innovation des 3D-Drucks in der Produktion in Zukunft eine tragende Rolle spielt. Branchenübergreifende Analysen der THG-Emissionen durch neue Produktionsformen, die eine standortnahe Fertigung erlauben, wären wünschenswert.

5.2 Handlungsfeld „Technologische Effizienz“

Maßnahmen in dem Bereich „Technologische Effizienz“ zielen auf Innovationen direkt an den Fahrzeugen ab. Sie machen die Fahrzeuge effizienter und sparen somit Treibstoff ein, was zu einem verminderten Ausstoß von Treibhausgasen und z. T. Schadstoffen führt. Folgende Maßnahmen wurden in diesem Handlungsfeld quantifiziert:

- ▶ Lkw Effizienz Aerodynamik
- ▶ Lang-Lkw
- ▶ Lkw: Mehrkammer-Fahrzeuge
- ▶ Langzug 740mPlus
- ▶ Binnenschiff: Energie-Effizienz
- ▶ Optimierte Verpackungssysteme
- ▶ Flugzeug: optimierte Triebwerke
- ▶ Seeschiff: optimierte Hydrodynamik
- ▶ Seeschiff: Zugdrachen
- ▶ Seehäfen: Landstrom

²³ Berücksichtigte Güterabteilungen: „chemische Erzeugnisse“, „Maschinen und Ausrüstungen, Haushaltsgeräte etc.“, „Fahrzeuge“, „Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte etc.“, „Geräte und Material für die Güterbeförderung“ und „Sammelgut“. Bezieht sich auf alle SNF und Distanzklassen, sowie nationale und internationaler Verkehre.

Die nachfolgende Abbildung 39 gibt einen Überblick der jeweils quantifizierten THG-Minderungspotentiale. Eine detaillierte Erläuterung zu den einzelnen Maßnahmen erfolgt im Anschluss an die Übersicht des gesamten Handlungsfelds. Generell sind die quantifizierten Minderungspotentiale in diesem Handlungsfeld vergleichsweise gering. Die höchsten mittelfristigen Einsparpotentiale gehen auf den Einsatz längerer Güterzüge, Verbesserungen bei der Lkw Effizienz durch Aerodynamikverbesserungen sowie auf den Einsatz von Zugdrachen bei Seeschiffen (jeweils ca. 0,9 Mio. t CO_{2eq}) zurück. Der Einsatz langer Züge erfordert in erster Linie erhebliche Aufrüstungen der Schieneninfrastruktur in Deutschland (in den Nachbarländern sind die infrastrukturellen Voraussetzungen bereits heute weitgehend vorhanden). Entsprechende Maßnahmen (v.a. längere Überholgleise) sind Bestandteil des Bundesverkehrswegeplans, die wichtigsten Lücken für die Befahrbarkeit mit 740m-Zügen sollen nach Planungen der DB Netze bis 2026 geschlossen sein (DB Netze, 2018). Zugdrachen für Seeschiffe lassen sich für existierende Schiffe nachrüsten, der Betrieb und die Wartung benötigt allerdings eine spezielle Schulung.

Die THG-Minderungspotentiale der übrigen Maßnahmen des Handlungsfelds Technologische Effizienz liegen zwar einzeln betrachtet jeweils deutlich niedriger, in Summe ergeben sie allerdings Potentiale von knapp 2 Mio. t CO_{2eq} pro Jahr. Sie begegnen in der Umsetzung unterschiedlichen Hürden, auf die bei den einzelnen Maßnahmenbeschreibungen kurz eingegangen wird.

In den nachfolgenden Abschnitten sind die einzelnen Maßnahmen und die jeweils getroffenen Annahmen näher beschrieben.

Abbildung 39: THG-Vermeidung – Technologische Effizienz

THG Vermeidung WTW

Mio. t CO₂eq pro Jahr



Quellen: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkung: *Beim theoretischen Maximalpotenzial werden die Emissionsfaktoren und Verkehrsmengen des Jahres 2030 herangezogen.

Lkw Effizienz Aerodynamik

Durch bauliche und technische Maßnahmen kann die Aerodynamik von Lkw deutlich verbessert werden, was unmittelbar zu einem sinkenden Kraftstoffverbrauch führt. Seitenverkleidungen am unteren Teil des Aufliegers verringern Verwirbelungen und den Luftwiderstand. Ein abgeschrägtes Heck bzw. die Anbringung eines Heckklappensystems am Ende des Aufliegers verbessert zudem die Aerodynamik. Diese sog. Winglets reduzieren die am Heck entstehenden Verwirbelungen und optimieren so die Luftströmung. Weiterhin kann die gesamte Form des Sattelschleppers hin zu einer Tropfenform optimiert werden, was allerdings Einbußen beim Ladungsraum mit sich bringt. Obwohl diese baulichen Maßnahmen schon lange bekannt sind und diskutiert werden, fanden sie bisher kaum Anwendung in der Praxis. Angaben von Praktikern zufolge werden aerodynamische Verbesserungen an Aufliegern und Lkw-Aufbauten derzeit noch sehr selten eingesetzt. Gründe dafür sind u. a. Vorbehalte hinsichtlich der Anwenderfreundlichkeit (z. B. „Aerodynamische Verkleidungen erschweren bei Wartungen und Reparaturen den Zugang zum Fahrzeug“) (Dünnebeil et al., 2015). Außerdem wurden in dieser Maßnahme noch Leichtlaufreifen berücksichtigt.

Tabelle 39 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Das Wirkpotential der Maßnahme im Zeithorizont 2030 ist durch die bis dahin erzielbare Flottendurchdringung begrenzt, die hier mit maximal 13 % angenommen wird. Hintergrund der Annahme ist, dass ein Hochlauf der Maßnahmenumsetzung bei Neufahrzeugen angesetzt wird. Eine umfassende Umrüstung von Bestandsfahrzeugen wird nicht angenommen.

Tabelle 39: Technologische Effizienz: Lkw Effizienz Aerodynamik

Lkw Effizienz Aerodynamik	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Seitenverkleidung für Lkw-Auflieger [1] Abgeschrägtes Heck und Winglets am Lkw-Auflieger [3]
Datenquellen	Heidt, C.; Biermann, K.; Dünnebeil, F.; Jamet, M.; Lambrecht, U.; Althaus, H.-J.; Wüthrich, P.; Hausberger, S. (2019): Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO ₂ -Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen. Abschlussbericht, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
Datenqualität	Sehr gut
Spezifische Wirkung	Reduktion der CO ₂ -Emissionen um 18,5 % für Sattelzüge (Heidt et al., 2019). Berücksichtigt werden aerodynamische Technologien und Leichtlaufreifen.
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: alle. Straßenverkehr: SNF >26t, alle Distanzklassen, nationale und internationale Verkehre.
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Es besteht Unsicherheit, in welchem Umfang die Maßnahme momentan bereits zum Einsatz kommt. Allgemein wird die Aerodynamik und der Rollwiderstand verbessert, aber Maßnahmen wie zusätzliche Verkleidungselemente werden aktuell nur in geringem Umfang eingesetzt. Eigene Annahmen zur Durchdringung der Maßnahme für die Flotte der schweren Nutzfahrzeuge: <u>Szenario Min</u> : 6 % der Transportleistung. <u>Szenario Mittel</u> : 9 % der Transportleistung. <u>Szenario Max</u> : 13 % der Transportleistung. <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : 100 % der Transportleistung.

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Max-Potenzial²</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-308	-463	-874	-6.922 (-6,23 %)
NO_x – TTW¹ [t/a]	-65	-97	-175	-1.387 (-0,58 %)

Anmerkung: ¹Verbesserungen bei NO_x-Emissionen werden über TREMOD abgeschätzt. Ein Vergleich zwischen Verbräuchen und Emissionen bei Leerfahrten und voller Beladung zeigt, dass 68 % Mehrverbrauch pro Fzkm entsteht, aber nur 12 % mehr NO_x-Emissionen. Daher wird die prozentuale Verbesserung bei NO_x-Emissionen mit nur 17 % (=12%/68 %) der Verbrauchsverbesserungen angenommen. ²Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Lang-Lkw

Die Maßnahme umfasst die Ausgestaltung von Lkw mit einer Erhöhung der Gesamtlänge von 25,25 m (Typ 2 bis 5) und im Maximalfall den Einsatz von Lang-Lkw Typ 1 (17,88 m). Dies erhöht entsprechend das Transportvolumen pro Fahrt und kann somit den Einsatz von Fahrzeugen reduzieren.

Tabelle 40 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Das Wirkpotential wird über den Feldversuch mit Lang-Lkw in Deutschland abgeleitet (Irzik, 2017). Von einer schnelleren Durchdringung oberhalb der im Feldtest angegebenen Potenziale ist mittelfristig nicht auszugehen, da Strecken abseits des Positivnetzes zunächst zu beantragen (Typ 2 bis 5) und Fahrzeugkombinationen mit Überlänge erforderlich sind. Ein weiteres Hemmnis stellt die Möglichkeit des Einsatzes im Ausland dar. Hier wären ebenfalls Fahrerlaubnisse zu erteilen.²⁴ Zudem könnten Investitionskosten für Auflieger- und Anhängeranpassungen bzw. Neuanschaffungen sowie Schulungen ein Hemmnis sein.

Die Befristung des Einsatzes von Lang-Lkw Typ 2-5 wurde zwar aufgehoben, jedoch bleibt der Einsatz von Lang-Lkw Typ 1 weiterhin bis Ende 2023 befristet. Eine Erhöhung sowohl der maximalen Maße für alle Lkw als auch des zulässigen Gesamtgewichts für BEV wird zurzeit im „Greening Freight Package“ diskutiert (Europäische Kommission, 2023). Der Einsatz von Typ 1 Lang-Lkw wird im Max-Szenario berücksichtigt. Im AP-Szenario wird darüber hinaus angenommen, dass z. T. auch internationale Verkehre durch Lang-Lkw erfolgen.

Lang-Lkw Typ 1 vergrößern das Ladevolumen um ca. 10 % und Lang-Lkw Typ 2-5 um 40-56 %. Hierdurch werden Fahrten ersetzt, jedoch kommt es pro Fahrt zu höheren Verbräuchen durch das höhere Fahrzeug- und Gütergewicht.

²⁴ Aktuell gibt es eine befristete Vereinbarung mit den Niederlanden bis 2024

Tabelle 40: Technologische Effizienz: Lang-Lkw

Lang-Lkw	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Lang-Lkw [5]
Datenquellen	Irzik, M. (2017): Feldversuch mit Lang-Lkw in Deutschland. Bundesanstalt für Straßenwesen.
Datenqualität	sehr gut
Spezifische Wirkung	Zwei Fahrten der Lang-Lkw-Typen ersetzen durchschnittlich 3 Fahrten mit konventionellen Lkw. Somit ergeben sich zwischen 15 % und 20 % weniger CO ₂ -Emissionen (Irzik, 2017).
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: „Nahrungs- und Genussmittel“, „Textilien und Bekleidung; Leder und Lederwaren“, „Holzwaren, Papier, Pappe, Druckerzeugnisse“ „Maschinen und Ausrüstungen, Haushaltsgeräte etc.“, „Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte etc.“, „Post, Pakete“ und „Sammelgut“, „Gutart unbekannt“ und „sonstige Güter“. Straßenverkehr: SNF >26t, Distanzklassen 50-150 km und >150 km. Internationalen Verkehr nur in Szenarien „Theor. Max-Pot.“ berücksichtigt.
Potentialabschätzung	<u>Baseline:</u> Im aktuellen Bestand sind vernachlässigbare Anteile von Lang-Lkw. Das Referenzszenario enthält keine Lang-Lkw. Belastungssteigerung pro Fahrzeug-km für schwere Nutzfahrzeuge größer 26 t (Irzik, 2017) für o. g. Distanzklassen und Güterabteilungen. Vermeidung von Fahrten durch Erhöhung der Beladung. Anteil an Fahrleistung für 2030 aus (Irzik, 2017; Kienzler et al., 2017): <u>Szenario Min:</u> 1 Mrd. Fzg-km Typ 2-5, Ersatz von 1,4 Fzg-km pro Fzg-km Typ 2-5. <u>Szenario Mittel:</u> 1,2 Mrd. Fzg-km Typ 2-5, Ersatz von 1,53 Fzg-km pro Fzg-km Typ 2-5. <u>Szenario Max:</u> 2 Mrd. Fzg-km Typ 2-5, Ersatz von 1,55 Fzg-km pro Fzg-km Typ 2-5. 7,6 Mrd. Fzg-km Typ 1, Ersatz von 1,1 Fzg-km pro Fzg-km Typ 1. <u>Theoretisches Maximalpotenzial:</u> Einsatz auch bei internationalen Relationen: 3,7 Mrd. Fzg-km Typ 2-5, Ersatz von 1,56 Fzg-km pro Fzg-km Typ 2-5. 10,4 Mrd. Fzg-km Typ 1, Ersatz von 1,1 Fzg-km pro Fzg-km Typ 1.

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-80	-112	-471	-717 (-0,65 %)
NO_x – TTW [t/a]	-92	-128	-543	-635 (-0,27 %)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Lkw: Mehrkammer-Fahrzeuge

Die Maßnahme umfasst die Unterteilung der Ladefläche in ein Mehrkammersystem. Bei Bedarf kann die Einteilung in unterschiedliche Temperaturzonen erfolgen. Somit können gleichzeitig mehrere Arten von Ladung transportiert und die Anzahl von Fahrten reduziert werden. Die Einteilung der Kammern kann dabei flexibel und volumenabhängig ausgestaltet werden. Diese Maßnahme könnte ein Teil des Maßnahmenpakets zur Reduktion von Leerfahrten sein, sofern die Kooperation über die Transportdienstleister hinweg gegeben ist.

Tabelle 41 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Bandbreite der Ergebnisse wird durch die Annahme zur Durchdringung der Maßnahme in der Fahrzeugflotte aufgespannt (Standardwerte: 25 %, 50 % und 75 % der Transportleistung).

Tabelle 41: Technologische Effizienz: Lkw: Mehrkammer-Fahrzeuge

Lkw: Mehrkammer-Fahrzeuge	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Anpassung Lkw in Mehrkammer-Fahrzeuge [6]
Datenquellen	Deckert, C. (2016): CSR und Logistik - Spannungsfelder Green Logistics und City-Logistik. Springer Verlag.
Datenqualität	gut
Spezifische Wirkung	Bei der Nutzung von 160 Mehrkammer-Lkw konnten 3,4 Mio. Fahrzeugkilometer pro Jahr eingespart werden (Deckert, 2016).
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: „Nahrungs- und Genussmittel“, „Textilien und Bekleidung; Leder und Lederwaren“, „chemische Erzeugnisse“, „Sammelgut“, „Gutart unbekannt“ und „sonstige Güter“. Straßenverkehr: alle SNF, alle Distanzklassen. Internationalen Verkehr nur in Szenarien „Max“ und „Theoretisches Maximalpotenzial“ angenommen.
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Mehrkammersysteme existieren bereits. Es besteht Unsicherheit, in welchem Umfang die Maßnahme momentan bereits zum Einsatz kommt. <u>Szenario Min</u> : 26% Auslastungserhöhung, 25 % Transportleistung. <u>Szenario Mittel</u> : 26% Auslastungserhöhung, 50 % Transportleistung. <u>Szenario Max</u> : 26% Auslastungserhöhung, 75 % Transportleistung. <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : 26% Auslastungserhöhung, 100 % Transportleistung.

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-118	-175	-282	-1.831 (-1,65%)
NO_x – TTW [t/a]	-154	-229	-335	-2.176 (-0,91%)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Langzug 740mPlus

Die Maßnahme zielt auf die Steigerung der Waggonzahl pro Zug ab. Damit steigt die Transporteffizienz pro Zug. Die Maßnahme ist ein Bestandteil des Maßnahmenkomplexes „Verlagerung Straße-Schiene“. Als Einzelmaßnahme mit überschaubaren Umsetzungshürden und großer Bedeutung wird sie hier nochmals separat quantifiziert.

Tabelle 44 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Bandbreite der Ergebnisse ist durch zwei Variablen bestimmt: zum einen durch den Anteil an Langzügen in der Flotte, zum zweiten durch die angenommene Verlagerungswirkung von der Straße auf die Schiene. Die Maßnahme zeigt eines der höchsten Treibhausgaseinsparpotenziale innerhalb des Handlungsfelds „Technologische Effizienz“. Für ihre Implementierung müssen vor allem Anforderungen an die Infrastruktur berücksichtigt werden. Im Bundesverkehrswegeplan sind entsprechende Maßnahmen zur Realisierung eines zusammenhängenden 740m-fähigen Schienennetzes bis 2030 vorgesehen (DB Netze, 2018).

Tabelle 42: Technologische Effizienz: Langzug 740mPlus

Langzug 740mPlus	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Längere Züge [9]
Datenquellen	(Allianz pro Schiene, 2016), (BMVI, 2016)
Datenqualität	sehr gut
Spezifische Wirkung	Länge steigt von 25-30 Waggons auf 35 Waggons; entweder werden weniger, aber dafür längere Züge eingesetzt und/ oder es werden 7-15 Lkw-Fahrten pro Zug vermieden. Der Verbrauch pro Zug-km steigt.
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: alle. Straße: SNF >26t, Distanzklasse >150 km, nationale und internationale Verkehre. Schiene.
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Es werden aktuell bereits lange Züge (>700m) eingesetzt. Engpässe gibt es noch bzgl. des Schienennetzes. Der momentane Umsetzungsgrad liegt bei unter 20 % und wird in der Berechnung berücksichtigt (Allianz pro Schiene, 2016). Auslastungsänderung und Verlagerung: <u>Szenario Min</u> : Halbe Reduktion der Zug-km und Verlagerung von Straße ggü. dem Szenario Mittel: -3,65 Mio. Zug-km, 0,88 Mrd. tkm Verlagerung → Erhöhung des Anteils von 740m Züge um 6 %-Pkt. <u>Szenario Mittel</u> : Reduktion der Zug-km um -7,41 Mio. und Verlagerung von 1,77 Mrd. tkm von der Straße → Erhöhung des Anteils von 740m Züge um 11 %-Pkt. (BMVI, 2016) <u>Szenario Max</u> : Reduktion der Zug-km um -7,41 Mio, Erhöhung des Anteils von 740m Züge auf 50 %. Bei konstanter Auslastung → 13,81 Mrd. tkm Verlagerung. <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : Keine Reduktion der Zug-km, Erhöhung des Anteils von 740m Züge auf 100 %. Bei konstanter Auslastung → 39,91 Mrd. tkm Verlagerung.

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-74	-146	-863	-2.757 (-2,48%)
NO_x – TTW [t/a]	-79	-158	-1.143	-3.394 (-1,42%)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Binnenschiff: Energie-Effizienz

Die Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (2012) beschreibt zwei Szenarien zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Treibhausgasemissionen der Binnenschifffahrt. Es wurden technische (u. a. effizientere Motoren) und den Schiffsbetrieb (u. a. Reiseoptimierung) betreffenden Maßnahmen ausgewählt. Das konservative Szenario ist schon im Trendszenario von TREMOD abgebildet, deshalb wurde zur Abbildung der Maßnahme das optimistische Szenario gewählt.

Tabelle 43 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Bandbreite der Ergebnisse wird aufgespannt durch

unterschiedliche Annahmen zur Durchdringung der Maßnahme in der Schiffsflotte (Min: 50 %, Mittel: 75 % und Max: 100 % der Transportleistung). Da die Studie bereits eine Flottendurchdringung berücksichtigt wird von den Standardwerten abgewichen und das Szenario Max mit 100 % angesetzt.

Tabelle 43: Technologische Effizienz: Binnenschiff: Energie-Effizienz

Binnenschiff: Energie-Effizienz	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Energie-Effizienz in der Binnenschifffahrt
Datenquellen	Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (2012): Möglichkeiten zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Treibhausgasemissionen in der Binnenschifffahrt. Bericht des Untersuchungsausschusses zur Herbsttagung 2012. Anlage 2 zu Protokoll 2012-II-4.
Datenqualität	gut
Spezifische Wirkung	Zusätzliche Effizienzsteigerung der Flotte um 1% pro Jahr (Zentralkommission für die Rheinschifffahrt, 2012).
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: alle. Binnenschifffahrt.
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Es ist davon auszugehen, dass neue Schiffe gegenüber älteren Schiffen effizienter sind. Deshalb wird im Trendszenario bereits von einer Effizienzsteigerung ausgegangen. Diese Maßnahme fokussiert auf eine forcierte Effizienzsteigerung in der Binnenschifffahrt. Effizienzsteigerung Binnenschiffe (Zentralkommission für die Rheinschifffahrt, 2012) und eigene Annahmen zur Transportleistung: <u>Szenario Min</u> : 10 % Verbesserung, 50 % Anteil Transportleistung. <u>Szenario Mittel</u> : 10 % Verbesserung, 75 % Anteil Transportleistung. <u>Szenario Max</u> : 10 % Verbesserung, 100 % Anteil Transportleistung. <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : Identisch zu Max-Szenario.

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Max-Potenzial¹</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-83	-125	-166	-166 (-0,15%)
NO_x – TTW [t/a]²	-	-	-	-

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.
²Als konservative Abschätzung wird angenommen, dass sich die NO_x-Emissionen nicht signifikant durch die Maßnahme reduzieren.

Optimierte Verpackungssysteme

Die Optimierung von Produktverpackungen, Transportkisten und Containern zielt hauptsächlich auf eine optimale Anpassung an das Produkt, um eine effiziente Handhabung, Konsolidierung und Zusammenlegung zu ermöglichen. Diese Maßnahme quantifiziert die Emissionsreduktionen beim Transport aus Gewichtseinsparung durch Vermeidung unnötiger Verpackung. Weitere Aspekte der Verbesserung von Verpackungssystemen (z. B. nachhaltiges

Verpackungsmanagement) werden indirekt über die Maßnahme Vermeidung von Leerfahrten adressiert.

Tabelle 44 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Bandbreite der Ergebnisse wird aufgespannt durch den angenommenen Anteil der Transportleistung mit optimierter Verpackung bei den infrage kommenden Güterabteilungen (Standardwerte: 25 %, 50 % und 75 % der Transportleistung).

Ähnlich wie der 3D-Druck wirkt diese Maßnahme zwar auf die Emissionen der Logistikbranche, für ihre Umsetzung müssen aber primär die Verlager bzw. Produzenten adressiert werden sowie eine optimale Verzahnung zwischen den verschiedenen Akteuren sichergestellt werden. Aus diesem Grund kann die Maßnahme in der Umsetzung als anspruchsvoll gelten.

Tabelle 44: Technologische Effizienz: Optimierte Verpackungssysteme

Optimierte Verpackungssysteme	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Neue Verpackungssysteme [67] Effiziente Verpackung und flexible Anpassung an Lieferfahrzeuge [68]
Datenqualität	Sehr gut
Datenquellen	ifeu; GVM (2021): Potenzial der Abfallvermeidung und des Ressourcenschutzes bei Reduktion von übermäßigen Verpackungen. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH, Heidelberg, Mainz.
Spezifische Wirkung	3% des Verpackungsgewichtes können im der Produktverpackung des privaten Endverbrauchs eingespart werden (ifeu & GVM, 2021).
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: „Nahrungs- und Genussmittel“, „Chemische Erzeugnisse“, „Post und Pakete“, „Gutart unbekannt“ und „sonstige Güter“. Straßenverkehr: alle SNF und LNF, alle Distanzklassen, nationale und internationale Verkehre.
Potenzialabschätzung	<u>Baseline</u> : Es besteht Unsicherheit, in welchem Umfang die Maßnahme momentan bereits zum Einsatz kommt. Gewichtseinsparung (ifeu & GVM, 2021) und eigene Annahmen zum Anteil an der Transportleistung für schwere und leichte Nutzfahrzeuge: <u>Szenario Min</u> : 3% Gewichtseinsparung, Anteil Transportleistung 25%. <u>Szenario Mittel</u> : 3% Gewichtseinsparung, Anteil Transportleistung 50%. <u>Szenario Max</u> : 3% Gewichtseinsparung, Anteil Transportleistung 75%. <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : 3% Gewichtseinsparung, Anteil Transportleistung 100%.

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-117	-233	-347	-460 (-0,41%)
NO_x – TTW [t/a]	-116	-231	-343	-455 (-0,19%)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Flugzeug: optimierte Triebwerke

Die Technologie der Flugzeugtriebwerke wird stetig weiterentwickelt. Neue Triebwerke haben einen geringeren Verbrauch und sparen somit THG-Emissionen ein. Die vorliegende Maßnahme bildet eine gegenüber der Referenzentwicklung (+1,16 % Effizienzgewinn pro Jahr) stärkere jährliche Effizienzsteigerung bei neuen Flugzeugtriebwerken von 1,8 % pro Jahr ab, die die erwarteten technischen Effizienzpotentiale voll ausschöpft.

Tabelle 45 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Bandbreite der Ergebnisse ist ausschließlich getrieben durch die Annahme zur Durchdringung der Maßnahme in der Flugzeugflotte (19 %, 29 % und 38 % der Transportleistung). Der Maximalwert geht von einer sehr schnellen Flottenerneuerung bis 2030 aus. Diese hohe Erneuerungsrate könnte aufgrund von finanziellen und logistischen Gründe als unwahrscheinlich eingestuft werden.

Tabelle 45: Technologische Effizienz: Flugzeug: optimierte Triebwerke

Flugzeug: optimierte Triebwerke	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Flugzeug, optimierte Triebwerke [14]
Datenquellen	BDLI (2020): Nachhaltige und klimaneutrale Luftfahrt aus Deutschland für die Energiewende am Himmel – Technologiestrategie der deutschen Luftfahrtindustrie. Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e. V., Berlin. BMDV (2018): Langlebigkeit der Flotten. Forschungs-Informations-System.
Datenqualität	gut
Spezifische Wirkung	Verbesserung der Triebwerke um 1,8% p.a. (BDLI, 2020). Diese wird mit der im Szenario angesetzten Verbesserung von 1,16% p.a. verrechnet. Es wird durch die Optimierung der Triebwerke ebenfalls eine Verbesserung bzgl. der Schadstoffemissionen in derselben Höhe angenommen.
Anwendungsbereich	Alle Güterabteilungen im Flugverkehr.
Potenzialabschätzung	<u>Baseline</u> : Eine Verbesserung der Triebwerke wurde bereits im Trendszenario für neue Flugzeuge angenommen. Die verbliebene Verbesserungsmarge (0,64 % p.a.) wurde in dieser Maßnahme berücksichtigt. Effizienzsteigerung Flugzeuge abgeleitet aus (BDLI, 2020) und Anteil an der Transportleistung, abgeleitet über Flottenerneuerungsrate aus Angaben von (BMDV, 2018): <u>Szenario Min</u> : 0,64% p.a. Verbesserung, 19% Anteil Transportleistung. <u>Szenario Mittel</u> : 0,64% p.a. Verbesserung, 29% Anteil Transportleistung. <u>Szenario Max</u> : 0,64% p.a. Verbesserung, 38% Anteil Transportleistung. <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : 0,64% p.a. Verbesserung, 100% Anteil Transportleistung.

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	Min	Mittel	Max	Theoretisches Maximalpotenzial ¹
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-82	-124	-165	-429 (-0,39%)
NO_x – TTW [t/a]	-265	-397	-529	-1.376 (-0,58%)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Seeschiff: optimierte Hydrodynamik

Eine optimierte Hydrodynamik verringert den Fahrwiderstand im Wasser und somit die benötigte Motorleistung, was zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch führt. Aufgrund des geringeren Anteils der Kraftstoffkosten an den Gesamtkosten ist der Effizienzdruck bei Schiffen nicht ganz so ausgeprägt wie bei Flugzeugen. Trotzdem unterliegt auch die Hydrodynamik ständiger Verbesserung. Da die Lebensdauer von Seeschiffen mit im Mittel etwa 30 Jahren (Hoffmann, 2020) sehr lang ist, kommt es hier allerdings zu deutlichen zeitlichen Verzögerungen, bis Verbesserungen in der Flotte ankommen. Verbesserungen an der Hydrodynamik können auch kaum nachgerüstet werden.

Tabelle 46 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Bandbreite der Ergebnisse wird bestimmt durch den angenommenen Anteil optimierter Schiffe in der Seeschiff flotte (20 %, 25 % und 30 % der Transportleistung).

Der Seeverkehr wird, wie der Flugverkehr, in der Bilanzierung exemplarisch behandelt, da er streng genommen außerhalb der Bilanzierungsgrenzen liegt. Um die Bedeutung des Seeverkehrs für die Logistik zu berücksichtigen, wurde neben dieser Maßnahme noch zwei weitere mit bewertet (Zugdrache, Landstrom).

Tabelle 46: Technologische Effizienz: Seeschiff: optimierte Hydrodynamik

Seeschiff: optimierte Hydrodynamik	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Optimierte Hydrodynamik bei Schiffen [11]
Datenquellen	Winnes, H., Styhre, L., Fridell, E. (2015): Reducing GHG emissions from ships in port areas. In: Research in Transportation Business & Management 17, S. 73-82. Erneuerungsrate bei Seeschiffen Hoffmann, J. (2020): Decarbonizing maritime transport: Estimating fleet renewal trends based on ship scrapping patterns. UNCTAD Transport and Trade Facilitation Newsletter Vol. 85, No. 45.
Datenqualität	gut
Spezifische Wirkung	Optimierung der Rumpfform und der Aufbauten können den Treibstoffverbrauch für alle Schiffstypen > 5.000 BRZ (Bruttoreaumzahl) um 15 % senken (Winnes et al., 2015). Studie unterscheidet bei der Effizienzsteigerung Schiffe größer und kleiner 5.000 Bruttoreaumzahl (BRZ). Für diese Maßnahme wird für die gesamte Flotte die konservativere Effizienzsteigerung von 15 % (Schiffe > 5.000 BRZ) angenommen.
Anwendungsbereich	Alle Distanzklassen und Gütergruppen, internationaler Verkehre. Seeschiffe.
Potenzialabschätzung	<u>Baseline</u> : Es handelt sich um eine fortlaufende Verbesserung. Es besteht allerdings Unsicherheit, in welchem Umfang das Potenzial der Maßnahme ausgeschöpft wird. Effizienzsteigerung Seeschiffe (Winnes et al., 2015) und Anteil an der Transportleistung, abgeleitet nach Flottenerneuerungsrate (Hoffmann, 2020): <u>Szenario Min</u> : 15 % Verbesserung, 20 % Anteil Transportleistung. <u>Szenario Mittel</u> : 15 % Verbesserung, 25 % Anteil Transportleistung. <u>Szenario Max</u> : 15 % Verbesserung, 30 % Anteil Transportleistung. <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : 15 % Verbesserung, 50 % Anteil Transportleistung.

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Max-Potenzial²</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-233	-292	-350	-583 (-0,53 %)
NO_x – TTW¹ [t/a]	-3.250	-4.062	-4.874	-8.124 (-3,41 %)

Anmerkung: ¹Änderungen der NO_x-Emissionen hergeleitet aus (Knudsen et al., 2022), (Faber et al., 2017), (Wiesmann, 2010) und (Rodrigue, 2022). ²Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Seeschiff: Zugdrachen

Gegenstand dieser Maßnahme ist ein vollautomatischer Zugdrachenantrieb, der mit Hilfe von Windenergie Frachtschiffe zusätzlich zum Motorantrieb zieht. Neben weiteren Windzusatzantrieben (u. a. Flettner-Rotoren) ist diese Technologie relativ leicht nachzurüsten. Somit muss bei der Annahme einer möglichen Einführungsgeschwindigkeit die relativ geringe Flottenerneuerungsrate bei Seeschiffen nicht berücksichtigt werden. Das Haupt-Hemmnis der Vergangenheit sind die verhältnismäßig geringen Kraftstoffkosten gegenüber den Gesamtkosten.

Tabelle 47 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Bandbreite der Ergebnisse ergibt sich aus den unterschiedlichen Annahmen zur Kraftstoffeinsparung (10-15 %) und zur Durchdringung der Maßnahme in der Seeschiff flotte (Standardwerte: 25 %, 50 % und 75 % der Transportleistung).

Tabelle 47: Technologische Effizienz: Seeschiff: Zugdrachen

Seeschiff: Zugdrachen				
Zusammenfassung	Vollautomatischer Zugdrachenantrieb, der mit Hilfe von Windenergie Frachtschiffe zusätzlich zum Motorantrieb zieht.			
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Schiff (Skysail) [10]			
Datenquellen	SkySails (2017): Skysails Propulsion System - Turn Wind into Profit. Hamburg.			
Datenqualität	gut			
Spezifische Wirkung	Der Treibstoffverbrauch kann unter idealen Bedingungen halbiert werden. Durchschnittlich werden 10-15% Treibstoff pro Jahr eingespart (SkySails, 2017).			
Anwendungsbereich	Gütergruppen: alle. Seeschifffahrt.			
Potenzialabschätzung	<p><u>Baseline:</u> Trotz der Marktreife der Technologie werden Zugdrachen in der Seeschifffahrt derzeit nicht in nennenswertem Umfang eingesetzt. Effizienzsteigerung Seeschiffe (SkySails, 2017) und Anteil an der Transportleistung (eigene Annahme):</p> <p><u>Szenario Min:</u> 10% Verbesserung, 25% Anteil Transportleistung.</p> <p><u>Szenario Mittel:</u> 12,5% Verbesserung, 50% Anteil Transportleistung.</p> <p><u>Szenario Max:</u> 15% Verbesserung, 75% Anteil Transportleistung.</p> <p><u>Theoretisches Maximalpotenzial:</u> 15% Verbesserung, 100% Anteil Transportleistung.</p>			
Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen				
	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Max-Potenzial²</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-195	-486	-875	-1.167 (-1,05%)
NO_x – TTW¹ [t/a]	-2.720	-6.800	-12.240	-16.320 (-6,85%)

Anmerkung: ¹Änderungen der NO_x-Emissionen hergeleitet aus (Knudsen et al., 2022), (Faber et al., 2017), (Wiesmann, 2010) und (Rodrigue, 2022). ²Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Seehäfen: Landstrom

Herkömmlicherweise erzeugen Seeschiffe ihren Bordstrombedarf über ihr Antriebssystem bzw. Hilfsmaschinen selbst. Wenn das Schiff im Hafen liegt, kann dieser Strombedarf auch aus dem landseitigen Netz gedeckt werden, was gegenüber der schiffseitigen Erzeugung den Ausstoß von Luftschadstoffen im Hafenbereich deutlich reduziert und in der Regel auch THG-Emissionsminderungen mit sich bringt. Voraussetzung ist, dass sowohl schiffs- als auch hafenseitig die technischen Voraussetzungen für die Landstromversorgung bestehen. Der aktuelle Stand der neuen EU-Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) enthält u. a. verbindliche Ziele für den Aus- und Aufbau einer Infrastruktur von Stromladepunkten für die landseitige Stromversorgung in See- und Binnenhäfen. Danach sollen Seehäfen mit mindestens 50 Hafenaufhalten von großen Fahrgastschiffen oder 100 Hafenaufhalten von Containerschiffen bis 2030 eine landseitige Stromversorgung für 90 % des Bedarfs bereitstellen (Europäische Kommission 2023).

Die THG-Einsparung durch Landstromversorgung erfolgt unter der Annahme des deutschen Strommixes für 2030 mit einem spezifischen THG-Emissionsfaktor von 355 g/kWh (ifeu, 2021). Für die Maßnahme werden schätzungsweise 380 GWh für das Jahr 2030 im Mittleren Szenario benötigt. Das entspricht ungefähr einem Prozent der jährlich erzeugten Energie aus deutschen Offshore-Anlagen (2020: 27,3 TWh²⁵).

Tabelle 48 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Bandbreite der Ergebnisse wird aufgespannt durch den angenommenen Anteil der mit Landstrom versorgten Seeschiffe in deutschen Häfen (Standardwerte: 25 %, 50 % und 75 % der Transportleistung). Zwar hat die Maßnahme ein vergleichsweise niedriges Treibhausgaseinsparpotenzial, Aspekte der Luftreinhaltung im Hafenbereich stellen aber eine wichtige Motivation für die Umsetzung der Maßnahme dar (die Umgebung der deutschen Seehäfen weist eine hohe Bevölkerungsdichte auf).

²⁵ https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html (16.09.2022)

Tabelle 48: Technologische Effizienz: Seehäfen: Landstrom

Seehafen: Landstrom	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Häfen - Implementierung von Landstrom [38]
Datenquellen	Stolz, B.; Held, M.; Georges, G.; Boulouchos, K. (2021): The CO ₂ reduction potential of shore-side electricity in Europe. In: Applied Energy. Vol. 285, S. 116425.
Datenqualität	Sehr gut
Spezifische Wirkung	3,7 % der gesamten CO ₂ -Emissionen der Seeschifffahrt können durch den Einsatz von Landstrom vermieden werden, wenn der benötigte Strom aus CO ₂ -neutralen Quellen bezogen wird (Stolz et al., 2021). Daraus ergibt sich für den deutschen Strommix für 2030 (355 g CO _{2eq} /kWh) eine Reduktion von 2,1 %.
Anwendungsbereich	Gütergruppen: alle. Seeschifffahrt.
Potenzialabschätzung	<u>Baseline</u> : Eine Umsetzung des Ausbaus von Landstrom ist nach AFIR fest geplant, aber im Referenzszenario nicht berücksichtigt. Nach dem Vorschlag der neuen EU-Verordnung soll eine Landstromversorgung der Schiffe für große Häfen zu 90 % gewährleistet sein. Effizienzsteigerung Seeschiffe (Stolz et al. 2021) und Anteil an der Transportleistung (eigene Annahme): <u>Szenario Min</u> : 2,1 % Verbesserung, 50 % Anteil Transportleistung. <u>Szenario Mittel</u> : 2,1 % Verbesserung, 75 % Anteil Transportleistung. <u>Szenario Max</u> : 2,1 % Verbesserung, 90 % Anteil Transportleistung. <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : 3,7 % Verbesserung, 100 % Anteil Transportleistung

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-82	-124	-148	-288 (-0,26 %)
NO_x – TTW [t/a]	-1.170	-1.755	-2.106	-4.084 (-1,71 %)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

5.3 Handlungsfeld „Antriebskonzepte“

Maßnahmen in dem Bereich „Antriebskonzepte“ bilden eine forcierte Einführung alternativer Antriebstechnologien im Straßenverkehr sowie in der Seeschifffahrt ab. Der Schienengüterverkehr bleibt hierbei außen vor, da er zu über 90 % mit elektrischer Traktion abgewickelt wird (Knörr et al., 2020). Auch für den Flugverkehr werden alternative Antriebskonzepte nicht betrachtet, da im Zeithorizont 2030 hier noch nicht mit einer nennenswerten Durchdringung zu rechnen ist (derzeit existieren lediglich Prototypen elektrischer oder mit Wasserstoff angetriebener kleinmotoriger Flugzeuge) und die langfristigen Potentiale sehr unsicher sind. Ähnliches gilt für die Binnenschifffahrt. Kurzfristig sollen hier hauptsächlich Biokraftstoffe zur THG-Minderung eingesetzt werden. Zwar gibt es erste Überlegungen zum Einsatz von Brennstoffzellenantrieben, ein signifikanter Einsatz solcher

Antriebe wird jedoch bis 2030 nicht als realistisch erachtet. Da es sich bei der Binnenschifffahrt um eine vergleichsweise kleine Branche mit einer langsamen Flottenumschichtung handelt, ist auch nicht damit zu rechnen, dass diese Branche bei der Einführung alternativer Antriebe von den Herstellern bevorzugt adressiert wird. Sämtliche genannten Aspekte sind auf der verwendeten Datengrundlage (TREMODO) berücksichtigt.

Folgende Maßnahmen wurden in diesem Handlungsfeld quantifiziert:

- ▶ Elektro-Lkw
- ▶ Oberleitungs-Lkw (rein elektrisch)
- ▶ Seeschiff: Erdgasantrieb mit fossilem LNG

Die nachfolgende Abbildung 40 gibt einen Überblick der jeweils quantifizierten THG-Minderungspotentiale. Durch Elektro-Lkw kann im Bezugsjahr 2030 gegenüber der Referenzentwicklung in einer WTW-Betrachtung maximal ca. 1,1 Mio. t CO_{2eq} eingespart werden. Betrachtet man nur die Auspuffemissionen (TTW) und damit die sektorale Bilanzgrenze, liegt die erzielbare Minderung mit 6,2 Mio. t CO_{2eq} deutlich höher. Zu beachten ist dabei, dass auch das Referenzszenario im Jahr 2030 bereits einen signifikanten Anteil von Elektro-Lkw enthält.

Oberleitungs-Lkw kommen insbesondere für den Lkw-Fernverkehr auf stark befahrenen Strecken in Betracht und haben dort ein THG-Minderungspotential von ca. 0,4 Mio. t CO_{2eq}. WTW (4,3 Mio. t TTW). Betrachtet werden hier lediglich vollelektrische Fahrzeuge. Gründe für die im Vergleich zu batterieelektrischen Lkw deutlich niedrigeren Potenziale ist die Beschränkung auf ausschließlich große Lkw (>26t). Zudem ist eine Umstellung insbesondere von internationalen Verkehren gehemmt durch den nötigen Infrastrukturausbau im Ausland. Aber auch durch das begrenzte Oberleitungsnetz (realistischer Ausbau bis 2030 nur auf wenigen Autobahnen) fällt das Gesamtpotenzial niedriger aus als bei BEV.

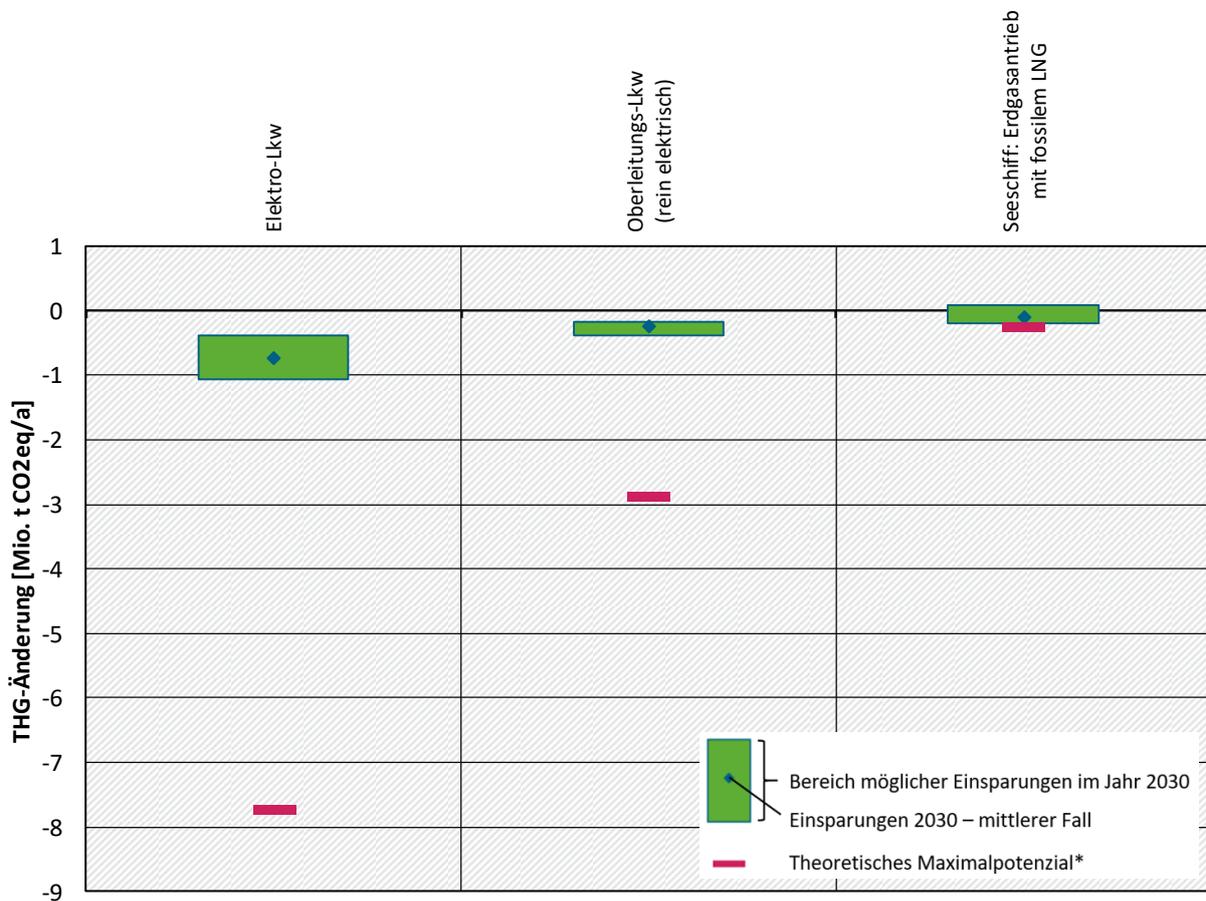
Bei den Seeschiffen wurde als Maßnahme die forcierte Einführung von LNG-Antrieben mit einem maximalen THG-Minderungspotential von 0,7 Mio. t CO_{2eq} abgeschätzt. Es ist zu beachten, dass diese Schätzung von sehr optimistischen Annahmen zu den Methanemissionen in den Vorketten und im Betrieb ausgeht. Bei etwas pessimistischeren Annahmen können Mehremissionen durch den Einsatz von LNG-Antrieben nicht ausgeschlossen werden. In den nachfolgenden Abschnitten sind die einzelnen Maßnahmen und die jeweils getroffenen Annahmen näher beschrieben.

Bei alternativen Antrieben ist im Regelfall nicht von einer Nachrüstung auszugehen. Der begrenzende Faktor für ihre Einführungsgeschwindigkeit ist somit die Flottenumschichtung. Die erzielbaren mittelfristigen THG-Minderungen sind daher in allen Fällen deutlich geringer als die langfristig denkbaren Maximalpotentiale bei vollständiger Durchdringung der jeweiligen Technologie in den geeigneten Segmenten.

Abbildung 40: THG-Vermeidung – Antriebskonzepte

THG Vermeidung WTW

Mio. t CO₂eq pro Jahr



Quellen: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkung: *Beim theoretischen Maximalpotenzial werden die Emissionsfaktoren des Jahres 2030 verwendet.

Für die mittelfristige Dekarbonisierung des Seeschiff- und Flugverkehrs stehen derzeit alternative Kraftstoffe im Zentrum der Diskussion. Neben Biokraftstoffen, die aus Nachhaltigkeitsgründen engen Potentialgrenzen unterliegen, sind dies vor allem strombasierte Kraftstoffe (sogenannte „eFuels“). Dazu zählen synthetisch hergestellte und auf erneuerbaren Energien basierende Kraftstoffe wie Wasserstoff, strombasiertes Kerosin oder strombasiertes Methanol oder eAmmoniak. Diese Kraftstoffe werden in der Direktverbrennung im Schiff bzw. Flugzeug zur Energiegewinnung genutzt (auch ist die Nutzung von Methanol in der Brennstoffzelle möglich). Die mittelfristige Verfügbarkeit solcher Kraftstoffe, ihre künftigen Preise sowie ihre Emissionsbilanz über den Lebenszyklus können zum jetzigen Zeitpunkt nicht sicher prognostiziert werden und hängen primär von Faktoren außerhalb der Logistik ab. Hier spielen insbesondere geopolitische Entwicklungen (Bereitschaft und Fähigkeit von Ländern mit hohem Potential für die Produktion erneuerbarer Kraftstoffe, diese für den Weltmarkt bereitzustellen) sowie regulatorische Randbedingungen in Deutschland und Europa (Klimaschutzambitionen, sektorübergreifende Allokation verfügbarer Energiemengen sowie Nachhaltigkeitsstandards für die Produktion erneuerbarer Kraftstoffe) eine zentrale Rolle. Aufgrund dieser Unsicherheiten wird hier davon abgesehen, Emissionsminderungspotentiale durch den Einsatz erneuerbarer Kraftstoffe zu quantifizieren.

Lkw: Elektro-Lkw

Mit der dynamischen Entwicklung der Batterietechnologie im Fahrzeugbereich haben sich in den vergangenen Jahren die erzielbaren Reichweiten für rein batterieelektrische Lkw (BEV-Lkw) deutlich erhöht und die benötigten Ladezeiten stark verkürzt. Sattelzugmaschinen, die mit einer Batterieladung eine Fahrt bis zur vorgeschriebenen Lenkzeitpause der Fahrer ermöglichen und innerhalb der Lenkzeitpause wieder vollgeladen werden können, stehen auf der Schwelle zur Markteinführung. Der Einsatz von BEV-Lkw wird daher für sämtliche Anwendungsfelder mittelfristig als realistisch erachtet.

Die vorliegende Maßnahme beschreibt eine gegenüber der Referenzentwicklung stark beschleunigte Einführung von Batterie-Lkw. Tabelle 49 fasst die nötigen Angaben zu ihrer Quantifizierung und die Ergebnisse zusammen. Die Annahmen basieren auf einer Studie, die die voraussichtliche Kostenentwicklung verschiedener Lkw-Antriebstechnologien bis zum Jahr 2030 untersucht hat (Jöhrens et al., 2022). Zur Bestimmung des Maximalpotentials wird angenommen, dass die Technologieentscheidung bei Lkw-Neuzulassungen im Zeitraum bis 2030 ausschließlich auf Basis der Vollkosten getroffen wird. Insbesondere mögliche Restriktionen bei der Verfügbarkeit elektrisch angetriebener Lkw am Markt sowie bei der Infrastrukturverfügbarkeit werden dabei vernachlässigt. In diesem Fall kann bis 2030 ein Anteil von BEV-Lkw am Bestand im Bereich von 10-25 % (je nach Größenklasse) erreicht werden. Aufgrund dieses geringen Anteils an der Fahrleistung sowie dem bis 2030 weiterhin vorhandenen Anteils fossiler Energieträger am Strommix, fallen die Potenziale der Maßnahme mittelfristig verhältnismäßig gering aus. Das langfristige Potential bei kompletter Umstellung des Bestands auf BEV-Lkw liegt weitaus höher, zudem profitiert die Technologie in einer WTW-Betrachtung von der weiter fortschreitenden Dekarbonisierung der Strombereitstellung.

Tabelle 49: Antriebskonzepte: Elektro-Lkw

Elektro-Lkw	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Lkw Flottenerneuerung (Elektro) [18]
Datenquelle	Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Räder, D.; Köllermeier, N.; Waßmuth, V. (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030: Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“. Gefördert durch Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, PTV Group, Heidelberg, Karlsruhe.
Datenqualität	Sehr gut
Spezifische Wirkung	Erhöhung des Anteils von BEV-Lkw im Bestand (und Fahrleistung). BEV-Lkw weisen mit Strommix 2030 je nach Größenklasse und Einsatzprofil um etwa 30-45 % geringere THG-Emissionen pro km auf.
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: alle. Straßenverkehr: LNF und alle SNF, alle Distanzklassen. Internationaler Verkehre nur in den Szenarien „Max“ und „Theor. Max-Pot.“ berücksichtigt.
Potentialabschätzung	Baseline: Aktuell ist der Anteil von BEV-Lkw am Bestand noch vernachlässigbar. Anteil Elektro-Lkw am Bestand von schweren und leichten Nutzfahrzeugen: <u>Szenario Min</u> : SNF <12 t = 12 %, SNF 12-26 t = 6 %, SNF >26 t = 7 %, LNF = 14 %. <u>Szenario Mittel</u> : SNF <12 t = 16 %, SNF 12-26 t = 8 %, SNF >26 t = 10 %, LNF = 19 %. <u>Szenario Max</u> : SNF <12 t = 20 %, SNF 12-26 t = 10 %, SNF >26 t = 13 %, LNF = 25 %. <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : SNF <12 t = 100 %, SNF 12-26 t = 100 %, SNF >26 t = 100 %, LNF = 100 %.

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-386	-746	-1.062	-7.738 (-6,97 %)
NO_x – TTW [t/a]	-3.425	-7.182	-10.231	-78.089 (-32,76 %)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Lkw: Oberleitungs-Lkw (rein elektrisch)

Die Elektrifizierung von Lkw erlaubt neben dem rein batterieelektrischen Antrieb mit stationärer Ladung auch die Energieversorgung über eine Oberleitung. Dieses Konzept ermöglicht den Einsatz von reinen BEV-Lkw mit kleineren Batterien (bei gleichem Einsatzprofil) und hybridischen Systemen²⁶. Dies macht die Energieversorgung flexibler, allerdings ist dafür eine bedarfsgerechte Oberleitungsinfrastruktur und Fahrzeuge mit Pantographen notwendig.

Tabelle 50 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Methodik der Bestimmung der

²⁶ Oberleitungshybride werden im Rahmen der Maßnahme nicht weiter untersucht.

Emissionsminderungspotentiale entspricht der bei der Maßnahme „Lkw, Elektro-Lkw“ angewandten, die Datengrundlagen stammen aus der gleichen Studie. Für das Szenario „Max“ wurde angenommen, dass der O-Lkw immer dann gewählt wird, wenn diese Technologie gegenüber den anderen verfügbaren Technologien einen Kostenvorteil hat; Grundlage für diese Berechnung ist ein Oberleitungsnetz von insgesamt 3.050 km Länge auf deutschen Autobahnen. Mögliche Restriktionen bei der Fahrzeugverfügbarkeit wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 50: Antriebskonzepte: Oberleitungs-Lkw (rein elektrisch)

Oberleitungs-Lkw				
Zusammenfassung	Einsatz von Oberleitungs-Lkw (O-Lkw)			
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Lkw Flottenerneuerung (OH) [19]			
Datenquelle	Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Räder, D.; Köllermeier, N.; Waßmuth, V. (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030: Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“. Gefördert durch Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, PTV Group, Heidelberg, Karlsruhe.			
Datenqualität	Sehr gut			
Spezifische Wirkung	Erhöhung des Anteils von Oberleitungs-Lkw im Bestand (und Fahrleistung). Oberleitungs-Lkw weisen ca. 40 % geringere THG-Emissionen pro km auf.			
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: alle. Straßenverkehr: SNF 12-26t und SNF >26t, alle Distanzklassen. Internationaler Verkehre nur in den Szenarien „Max“ und „Theor. Max-Pot.“ berücksichtigt.			
Potentialabschätzung	Baseline: Es besteht keine Unsicherheit, da im Referenzfall keine Oberleitungs-Lkw angenommen sind. Aktuell gibt es keine gewerbliche Anwendung. Anteil Elektro-Lkw und O-Lkw an schweren Nutzfahrzeugen: <u>Szenario Min:</u> O-Lkw: SNF 12-26t = 4%, SNF >26t = 6%. <u>Szenario Mittel:</u> O-Lkw: SNF 12-26t = 7%, SNF >26t = 9% <u>Szenario Max:</u> O-Lkw: SNF 12-26t = 9 %, SNF >26t = 11% <u>Theoretisches Maximalpotenzial:</u> O-Lkw: SNF 12-26t = 94%, SNF >26t = 95%.			
Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen				
	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-179	-238	-377	-2.879 (-2,59%)
NO_x – TTW [t/a]	-2.910	-3.867	-6.490	-49.334 (-20,70%)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Seeschiff: Erdgasantrieb mit fossilem LNG

Die Maßnahme zielt auf die Reduktion der THG-Emissionen durch den Einsatz von fossilen LNG-Antrieben bei Seeschiffen. Tabelle 51 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme „Seeschiff, alternative Antriebe“ und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Maßnahme hat ein vergleichsweise mittleres Treibhausgaseinsparpotenzial. Die Bandbreite der Ergebnisse orientiert sich an der angenommenen Transportleistung zwischen 15 % und 20 %.

Der Einsatz von fossilen LNG wird von der Industrie als Übergangstechnologie hinzu einer CO₂-neutralen Energiebasis gesehen. Es ist zu berücksichtigen, dass die Verwendung von LNG als Kraftstoff in der Seeschifffahrt (und auch anderen Anwendungsgebieten) aus Klimaperspektive kritisch diskutiert wird (u. a. Worldbank 2021). Methan ist ein 30-fach potenteres Klimagas als CO₂ bezogen auf das GWP 100, bei GWP 20 liegt der Wert sogar bei über 80 (Pörtner et al., 2022). Aktuelle Untersuchungen legen nahe (Jackson et al., 2020; Saunio et al., 2020), dass bei der Förderung und dem Transport von Erdgas deutlich höhere Methanmengen in die Atmosphäre entweichen als bei früheren Bilanzen angenommen. Gerade Erdgas aus Fracking weist besonders hohe Emissionen auf (Pavlenko et al., 2020). Die Verflüssigung des Erdgases zu LNG ist energieintensiv, und auch bei seiner Lagerung und Verbrennung kann es zum Austritt von Methan in die Atmosphäre kommen. Einige Studien gehen daher davon aus, dass der Einsatz von LNG sogar zu einem größeren THG Ausstoß führt, als der Einsatz von konventionellen Kraftstoffen (Lindstad, 2019).

Die vorliegende Potentialabschätzung geht im Szenario Min von zusätzlichen THG-Emissionen (+ 8%) durch Methan-Schlupf aus. Für die anderen Szenarien ist der Methan-Schlupf durch Anpassungen an den Motoren besser kontrolliert und es kommt zu einer THG-Einsparung. Es ist jedoch zu beachten, dass höhere Leckagen in der Vorkette hier nicht berücksichtigt werden können, dies aber je nach Bandbreite einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Einen noch größeren Effekt hat der gewählte Betrachtungszeitraum des GWP (Global Warming Potential). In dieser Studie sind die Ergebnisse an dem GWP100 orientiert. Der Betrachtungszeitraum von GWP 20 priorisiert Klimagase wie Methan mit kürzerer Verweildauer in der Atmosphäre. Dessen Betrachtung macht bei Bewertung dieser Maßnahme Sinn, da hier insbesondere die Methanemissionen als kritisch und nicht optimal kontrolliert einzustufen sind. Nach Pavlenko et al. (2020) sind es im schlechtesten Fall über 40 % zusätzliche THG-Emissionen gegenüber der Baseline in einer GWP20 Analyse.

Tabelle 51: Antriebskonzepte: Seeschiff: Erdgasantrieb mit fossilem LNG

Seeschiff: Erdgasantrieb mit fossilem LNG	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	LNG Schiff [21]
Datenquellen	Pavlenko, N.; Comer, B.; Zhou, Y.; Clark, N.; Rutherford, D. (2020): The climate implications of using LNG as a marine fuel. Working Paper International Council on Clean Transportation (icct) Hoffmann, J. (2020): Decarbonizing maritime transport: Estimating fleet renewal trends based on ship scrapping patterns. UNCTAD Transport and Trade Facilitation Newsletter Vol. 85, No. 45.
Datenqualität	Sehr gut
Spezifische Wirkung	Die Spannweite der THG-Emissionen durch den Einsatz von fossilem LNG reicht je nach eingesetzten Motorentyp von 8 % zusätzlichen THG-Emissionen bis hin zu 15% THG-Einsparungen (Pavlenko et al. 2020).
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: alle. Seeschifffahrt.
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Aktuell beträgt der Anteil von LNG am Energieverbrauch der Seeschifffahrt etwa 5%. Reduktionspotenzial durch den Einsatz alternativer Kraftstoffe (Pavlenko et al., 2020): <u>Szenario Min</u> : 88% THG-Erhöhung (durch Methanschlupf) pro tkm für 15% der Transportleistung. Orientiert an Erneuerungsrate von Seeschiffen (2,5% p.a.) (Hoffmann, 2020). <u>Szenario Mittel</u> : 10% THG-Reduktion pro tkm für 15% der Transportleistung. <u>Szenario Max</u> : 15% THG-Reduktion pro tkm für 20% der Transportleistung. <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : 15% THG-Reduktion pro tkm für 25% der Transportleistung. Alle Schiffsneubauten ab 2020 sind mit LNG Kraftstoffen betrieben (eigene Annahme).

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Max-Potenzial²</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	+82	-102	-204	-255 (-0,23%)
NO_x – TTW¹ [t/a]	-4.139	-12.418	-18.213	-24.836 (-10,42%)

Anmerkung: ¹NO_x-Reduktionen aus (Stenersen & Thonstad, 2017). ²Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

5.4 Handlungsfeld „Lagerei“

Die Lagerlogistik macht einen relevanten Anteil an den Emissionen der Logistik aus. Zwischen 25-30 % der THG-Emissionen aus dem Güterverkehr und Lagerei resultieren aus dem Betrieb der Lagergebäude. Bei den Schadstoffemissionen spielen Lagergebäude demgegenüber eine untergeordnete Rolle, deren NO_x-Emissionen haben lediglich einen Anteil von knapp 3 % bezogen auf die gesamte Logistik. Im Handlungsfeld „Lagerei“ werden sechs Maßnahmen analysiert. Diese betreffen sowohl Prozesse des Lagerbetriebs als auch Anpassungen an der Gebäudehülle und der Energieversorgung der Gebäude:

- ▶ Optimierung Intralogistik - effiziente Inhouse Logistik
- ▶ Optimierung Gebäudehülle - Gebäudestandards für Lagerlogistik
- ▶ Verladetore - Effiziente Temperatursteuerung in Gebäuden
- ▶ Optimierte Beleuchtung - Intelligente Beleuchtungssteuerung
- ▶ Einsatz von Wärmepumpen in Lagern
- ▶ Photovoltaik auf Lagerhallen

Abbildung 41 zeigt die THG-Vermeidungspotenziale der Einzelmaßnahmen. Durch Anpassungen in der Intralogistik können THG-Emissionen im Bereich von 0,10-0,28 Mio. t CO_{2eq} pro Jahr vermieden werden. Leicht höher sind die Potenziale einer optimierten Beleuchtung und einer Temperatursteuerung bzw. einer Abdichtung der Verladetore. Hier können jeweils 0,18-0,58 Mio. t vermieden werden. Beide Maßnahmen können im Gegensatz zu einigen Maßnahmen in der Intralogistik durch Nachrüstungen vergleichsweise leicht realisiert werden. Eine Verbesserung der Wärmedämmung an der Gebäudehülle kann im Jahr 2030 bis zu 0,68 Mio. t THG vermeiden und liegt damit beim Minderungspotential ebenfalls in derselben Größenordnung.

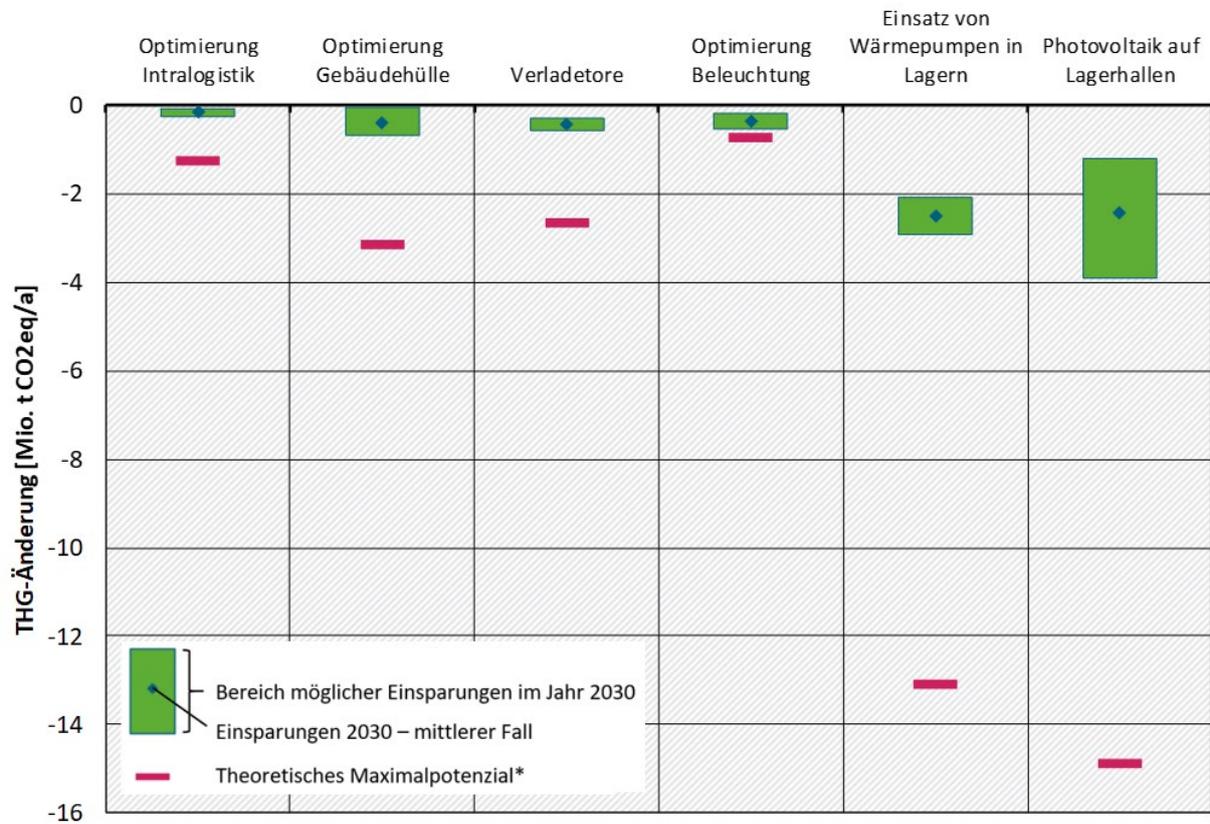
Deutlich höhere Potenziale weist der Einsatz von Wärmepumpen und Photovoltaik auf. Hier können THG-Emissionen im Bereich von 2,1-2,9 Mio. t bzw. 1,2-3,9 Mio. t THG im Jahr 2030 reduziert werden, sofern die nötigen Rahmenbedingungen geschaffen werden oder entstehen. Ein Engpass besteht insbesondere bei der Verfügbarkeit von Kapazität im Handwerk für den Ausbau bei beiden Technologien. Wenn langfristig die Potentiale für den Einsatz von Photovoltaik und Wärmepumpen im Bereich Lagerei nahezu vollständig im Gebäudebestand genutzt werden können, lassen sich zusammengenommen Einsparungen von etwa 28 Mio. t THG pro Jahr realisieren, was bilanziell einer fast vollständigen Dekarbonisierung des Bereichs Lagerei entsprechen würde. Zu beachten ist, dass sich all diese Werte auf die Bilanzgrenze Well-to-Wheel beziehen, also die Energiebereitstellung einschließen.

In den nachfolgenden Abschnitten sind die einzelnen Maßnahmen und die jeweils getroffenen Annahmen näher beschrieben.

Abbildung 41: THG-Vermeidung – Lagerei

THG Vermeidung WTW

Mio. t CO₂eq pro Jahr

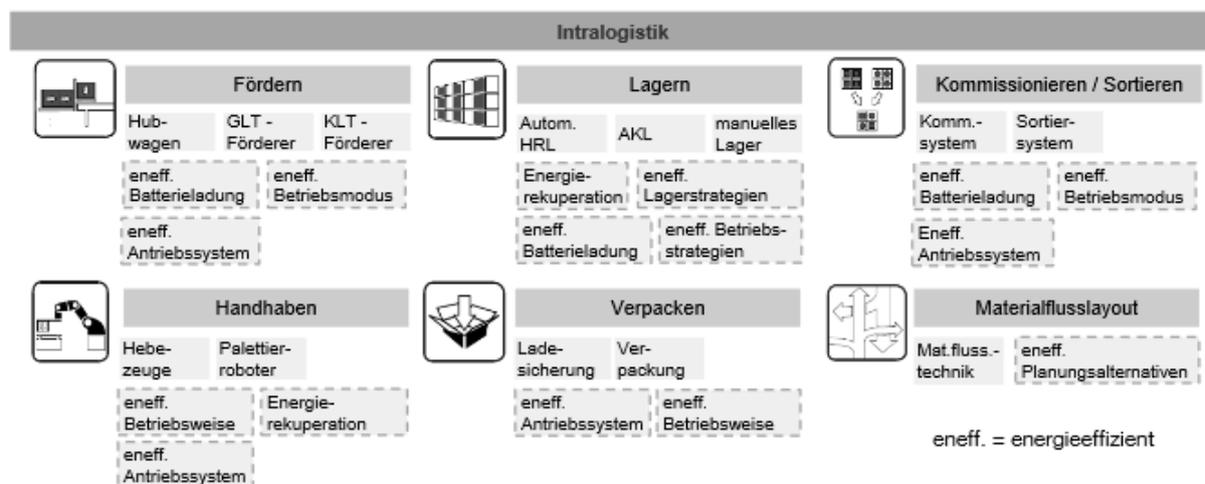


Quellen: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkung: *Beim theoretischen Maximalpotenzial werden die Emissionsfaktoren und Verkehrsmengen des Jahres 2030 herangezogen.

Optimierung Intralogistik - effiziente Inhouse Logistik

Die Intralogistik umfasst die Organisation, Steuerung und Durchführung der Materialflüsse in Lagern. Abbildung 42 zeigt die Grundelemente der Intralogistik. Für diese Elemente werden Planungsalternativen analysiert sowie die hieraus resultierenden Änderungen der Energieflüsse und Emissionen.

Abbildung 42: Grundelemente der Intralogistik



Quellen: (Freis, 2017).

Im Rahmen der Maßnahme werden eine Reihe von energiesparenden Anpassungen der Inhouse-Logistik untersucht:

- ▶ Einsatz von energieeffizienten Hubwagen und unterschiedlicher Fördertechniken (GLT Ketten- und Rollenförderer, KLT Rollen- und Bandförderer)
- ▶ Manuelle Lager ggü. automatisierte Hochregal- und Kleinteilelager
- ▶ Einsatz unterschiedlicher Kommissioniersystemen
- ▶ Einsatz von effizienten Paketierrobotern

Dadurch verändert sich der Energiebedarf der Lager. Neben direkten Energieeinsparungen kommt es auch zu Verlagerungseffekten beim Energieverbrauch: z. B. müssen manuelle Lager stärker beheizt werden als vollautomatisierte, weisen jedoch einen geringeren Strombedarf auf. In der Studie Freis (2017) werden unterschiedliche Maßnahmen im Bereich Inhouse-Logistik mit variierender Ausprägung untersucht. Daraus resultierende Änderungen von inneren thermischen Lasten werden im Heiz- bzw. Kühlbedarf berücksichtigt.

Tabelle 52 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Bandbreite der Ergebnisse resultiert aus den Annahmen zum Energieeinsparpotenzial (15 % bis 38 %) und zum beeinflussten Flächenanteil der Lager (13 % bis 22 %). Das quantifizierte THG-Einsparpotential ist von allen Maßnahmen des Handlungsfelds „Lagerei“ am geringsten, was nicht zuletzt auf zusätzliche Energieaufwände für die Automatisierung von Prozessen zurückgeht.

Tabelle 52: Lagerei: Optimierung Intralogistik - effiziente Inhouse Logistik

Optimierung Intralogistik - effiziente Inhouse Logistik	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Effiziente Inhouse Logistik [43]
Datenquellen	Freis, J. (2017): Wechselwirkungen und Auswirkungen von Planungsalternativen auf die Gesamtenergiebilanz und die CO ₂ -Emissionen von Logistikzentren. Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München.
Datenqualität	Sehr gut
Spezifische Wirkung	Durch Änderungen bei den aufgelisteten Punkten ändert sich der Energiebedarf der Lager. Zum Beispiel sind manuelle Lager stärker zu beheizen, aber weisen einen geringeren Strombedarf auf. In der Quelle werden unterschiedliche Maßnahmen mit variierender Ausprägung untersucht.
Anwendungsbereich	Lagertyp: alle. Lagerart: alle. Alter/Sanierungsstand: alle. Beheizung: beheizt und unbeheizt.
Potentialabschätzung	<p><u>Baseline</u>: Welcher Ansatz und welche Technologien in welchem Umfang eingesetzt werden, ist nur grob abschätzbar. Daher sind die Unsicherheiten bei der Potenzialermittlung hoch.</p> <p><u>Szenario Min</u>: Verbesserungen beim intralogistischen Transportenergiebedarf (mechanischen Arbeit) im Bereich von 15-32% je nach Lager für 13%* der Fläche.</p> <p><u>Szenario Mittel</u>: Verbesserungen bei der mechanischen Arbeit im Bereich von 20-34% je nach Lager für 18%* der Fläche.</p> <p><u>Szenario Max</u>: Verbesserungen bei der mechanischen Arbeit im Bereich von 25-38% je nach Lager für 22%* der Fläche.</p> <p><u>Theoretisches Maximalpotenzial</u>: Verbesserungen bei der mechanischen Arbeit im Bereich von 25-38% je nach Lager für 100% der Fläche.</p> <p>*Flächenanteil abgeschätzt anhand Annahmen aus Maßnahmen „Lager, Einsatz von Wärmepumpen“ und „Lager, Gebäudestandards für Lagerlogistik“. Hierbei wird angenommen, dass insb. Bestandsgebäude aufgrund von Engpässen nicht umfassend bis 2030 bzgl. der Intralogistik optimiert werden können. Hier wird angenommen, dass ähnliche Engpässe wie bei der Sanierung von Gebäudehüllen und Wärmeerzeugern vorliegen.</p>

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial</i> ¹
THG – mit Vorkette [kt CO_{2eq}/a]	-91	-171	-276	-1.256 (-1,13%)
NO_x – direkt [t/a]	-42	-81	-133	-606 (-0,25%)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Optimierung Gebäudehülle - Gebäudestandards für Lagerlogistik

Diese Maßnahme bildet Verbesserungen der thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle ab. Die Verbesserungen könnten beispielsweise durch verbindliche gesetzliche Gebäudestandards realisiert werden. Im Detail betrachtet werden eine verstärkte Dämmung sowie verbesserte Fassaden- und Dachfenster.

Tabelle 53 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Bandbreite der Ergebnisse resultiert aus den Annahmen zur Reduktion des Heizbedarfes (3,5 % bis 30,4 %), zur Reduktion des Kühlbedarfes (0,1 % bis 3,9 %) und zum sanierten Anteil der gesamten Lagerfläche (11 % bis 22 %). Die vergleichsweise äußerst geringen Minderungen im Szenario „Min“ verdeutlichen, dass bei geringer Sanierungsrate zumindest ein ambitionierter Anspruch bei den durchgeführten Sanierungen notwendig ist, um nennenswerte Effekte zu erzielen.

Tabelle 53: Lagerei: Optimierung Gebäudehülle - Gebäudestandards für Lagerlogistik

Optimierung Gebäudehülle - Gebäudestandards für Lagerlogistik	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Gebäudestandards für Lagerlogistik [44]
Datenquellen	Freis, J. (2017): Wechselwirkungen und Auswirkungen von Planungsalternativen auf die Gesamtenergiebilanz und die CO ₂ -Emissionen von Logistikzentren. Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München. Freudenberg, J.; Meyer, H.; Bäumer, T.; Huber, S.; Popovic, T.; Schneider, U.; Commenges, J.; Ebenbeck, L. (2019): Das Quartier als Schlüssel zur Steigerung der Sanierungsrate - Erkenntnisse aus dem „Drei Prozent Projekt - energieeffizienter Sanierungsfahrplan für kommunale Quartiere 2050“. Deutscher Verband für Wohnungswesen, Städtebau und Raumordnung e. V., Hochschule für Technik Stuttgart, B.&S.u. Beratungs- und Service-Gesellschaft Umwelt mbH, Berlin.
Datenqualität	Sehr gut
Spezifische Wirkung	Eine Verbesserung der Gebäudehülle bewirkt eine Reduktion der Heizlast um bis zu 30,4% und der Kühllast um bis zu 3,9%.
Anwendungsbereich	Lagertyp: alle. Lagerart: alle. Alter/Sanierungsstand: >30 und unsaniert. Beheizung: beheizt.
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Der aktuelle Zustand der Gebäude bzgl. der Gebäudehülle ist wenig bekannt. <u>Szenario Min</u> : Reduktion des Heizbedarfs zwischen 3,5-4,9% je nach Lager und des Kühlbedarfs um 0,1% für 11%* der Fläche. <u>Szenario Mittel</u> : Reduktion des Heizbedarfs zwischen 11,9-24% je nach Lager und des Kühlbedarfs um 3,2% für 16%* der Fläche. <u>Szenario Max</u> : Reduktion des Heizbedarfs zwischen 20,4-30,4% je nach Lager und des Kühlbedarfs um 3,9% für 22%* der Fläche. <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : Reduktion des Heizbedarfs zwischen 20,4-30,4% je nach Lager und des Kühlbedarfs um 3,9% für 100% der Fläche. *Maximaler Anteil über Sanierungsquote aus Freudenberg et al. (2019) hergeleitet. Für das Szenario Min wurde die Hälfte der Fläche angenommen.

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – mit Vorkette [kt CO_{2eq}/a]	-55	-403	-683	-3.160 (-2,84%)
NO_x – direkt [t/a]	-20	-144	-245	-1.132 (-0,47%)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Verladetore - Effiziente Temperatursteuerung in Gebäuden

Die Maßnahme betrachtet die Wirkung durch Reduktion von Lüftungswärmeverlusten. Diese Reduktion kann Bspw. durch den Einsatz von Vorsatzzschleusen im Verladebereich erzielt werden. Einen quantitativ ähnlichen Einfluss auf den Wärmebedarf hat auch eine effizientere Temperatursteuerung.

Tabelle 54 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Bandbreite der Ergebnisse ergibt sich aus dem beeinflussten Flächenanteil der Lager (13 % bis 22 %).

Tabelle 54: Lagerei: Verladetore - Effiziente Temperatursteuerung in Gebäuden

Verladetore - Effiziente Temperatursteuerung in Gebäuden	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Effiziente Temperatursteuerung in Gebäuden [40]
Datenquellen	Freis, J. (2017): Wechselwirkungen und Auswirkungen von Planungsalternativen auf die Gesamtenergiebilanz und die CO ₂ -Emissionen von Logistikzentren. Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München.
Datenqualität	Gut
Spezifische Wirkung	Eine Verringerung der Lüftungswärmeverluste bewirkt eine Reduktion der Heizlast um 19-23 % je nach Lagertyp.
Anwendungsbereich	Lagertyp: Standardlager. Lagerart: alle. Alter/Sanierungsstand: alle. Beheizung: beheizt.
Potentialabschätzung	Baseline: Der aktuelle Einsatz von verbesserten Verladetoren und effizienten Temperatursteuerungen ist unbekannt. Szenario Min: Reduktion des Heizbedarfs zwischen 19-23% je nach Lager für 13%* der Fläche. Szenario Mittel: Reduktion des Heizbedarfs zwischen 19-23% je nach Lager für 18%* der Fläche. Szenario Max: Reduktion des Heizbedarfs zwischen 19-23% je nach Lager für 22%* der Fläche. Theoretisches Maximalpotenzial: Reduktion des Heizbedarfs zwischen 19-23% je nach Lager für 100% der Fläche. *Flächenanteil abgeschätzt anhand Annahmen aus Maßnahmen „Lager, Einsatz von Wärmepumpen“ und „Lager, Gebäudestandards für Lagerlogistik“

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – mit Vorkette [kt CO_{2eq}/a]	-289	-433	-578	-2.672 (-2,41%)
NO_x – direkt [t/a]	-99	-148	-198	-915 (-0,38%)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Optimierte Beleuchtung - Intelligente Beleuchtungssteuerung

In der Maßnahme wird der Einsatz von LED statt Leuchtstofflampen und Bewegungssteuerung der Beleuchtung betrachtet, wodurch der Strombedarf reduziert werden kann. Als positiver Nebeneffekt reduziert sich auch der Kühlbedarf. Demgegenüber steigt der Heizbedarf aufgrund der geringeren Abwärme im Gebäude.

Tabelle 55 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Bandbreite der Ergebnisse wird bestimmt durch den beeinflussten Flächenanteil der Lager (Standardwerte: 25 %, 50 %, 75 %). Die spezifischen Wirkungen auf den Energieverbrauch bei Umsetzung der Maßnahme werden hingegen in den betrachteten Fällen identisch angenommen (Reduktion des Strombedarfs für Beleuchtung um 60 %). Gemessen an der Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit moderner Beleuchtungstechnologie ist dies eine direkt umsetzbare Maßnahme, deren Potenzial leicht zu heben ist.

Tabelle 55: Lagerei: Optimierte Beleuchtung - Intelligente Beleuchtungssteuerung

Optimierte Beleuchtung - Intelligente Beleuchtungssteuerung	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Intelligente Beleuchtungssteuerung [41]
Datenquellen	Freis, J. (2017): Wechselwirkungen und Auswirkungen von Planungsalternativen auf die Gesamtenergiebilanz und die CO ₂ -Emissionen von Logistikzentren. Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München.
Datenqualität	Sehr gut
Spezifische Wirkung	Reduktion des Strombedarfs für die Beleuchtung und die Kühlung. Erhöhter Heizbedarf.
Anwendungsbereich	Lagertyp: alle. Lagerart: alle. Alter/Sanierungsstand: alle. Beheizung: beheizt und unbeheizt.
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Der aktuelle Einsatz von LED und Bewegungssteuerung der Beleuchtung ist unbekannt. <u>Szenario Min</u> : Reduktion des Strombedarfs für Licht um 60% sowie des Kühlbedarfs je nach Lagerart um 0,8-3,1% und Erhöhung des Heizbedarfs je nach Lager um 7,8-19% für 25% der Fläche. <u>Szenario Mittel</u> : Reduktion des Strombedarfs für Licht um 60% sowie des Kühlbedarfs je nach Lagerart um 0,8-3,1% und Erhöhung des Heizbedarfs je nach Lager um 7,8-19% für 50% der Fläche. <u>Szenario Max</u> : Reduktion des Strombedarfs für Licht um 60% sowie des Kühlbedarfs je nach Lagerart um 0,8-3,1% und Erhöhung des Heizbedarfs je nach Lager um 7,8-19% für 75% der Fläche. <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : Reduktion des Strombedarfs für Licht um 60% sowie des Kühlbedarfs je nach Lagerart um 0,8-3,1% und Erhöhung des Heizbedarfs je nach Lager um 7,8-19% für 100% der Fläche.

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial²</i>
THG – mit Vorkette [kt CO_{2eq}/a]	-180	-360	-541	-721 (-0,65%)
NO_x – direkt [t/a]¹	+105	+211	+316	+421 (+0,18%)

Anmerkung: ¹Aufgrund der geringeren Abwärme steigt die Heizlast und somit auch die direkten NO_x-Emissionen. Bei Berücksichtigung der eingesparten NO_x-Emissionen in der Stromerzeugung werden diese Mehremissionen jedoch überkompensiert, z. B. im Minimalfall resultiert eine Reduktion der NO_x-Emissionen direkt+Vorkette von 195 t.

²Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Einsatz von Wärmepumpen in Lagern

In dieser Maßnahme wird der Einsatz von Wärmepumpen für die Beheizung der Lager abgebildet. Aufgrund der höheren Energieeffizienz durch Nutzung von Umweltwärme wird der Endenergiebedarf gesenkt. Brennstoffbedarf (Öl und Gas) wird dabei durch Einsatz von Strom ersetzt.

Tabelle 56 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Bandbreite der Ergebnisse wird aufgespannt durch den angenommenen Anteil an Lagerhallen (16 % bis 22 %), die im Jahr 2030 mit Wärmepumpen beheizt werden. Das obere Ende der Bandbreite korrespondiert wiederum mit der maximal erzielbaren Sanierungsrate, wobei kurzfristig aufgrund von Kapazitätsengpässen mit einer geringeren Erneuerungsrate gerechnet wird, während nach 2025 auch Nachrüstungen außerhalb der regulären Sanierungsrate in Betracht gezogen werden.

Anzumerken ist, dass ein vorteilhafter Einsatz von Wärmepumpen von der Gebäudetechnik und -dämmung abhängt. Oft ermöglichen Sanierungen an der Gebäudehülle eine Reduktion der Vorlauftemperaturen des Heizungssystems und begünstigen somit auch den Einsatz von Wärmepumpen.

Tabelle 56: Lagerei: Einsatz von Wärmepumpen in Lagern

Lager, Einsatz von Wärmepumpen in Lagern	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Einsatz von Wärmepumpen
Datenquellen	Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2022): Starkes Wachstum im Wärmepumpenmarkt. Berlin. dena (2021): Dena-Gebäudereport 2022. Deutsche Energie-Agentur (dena), Berlin.
Datenqualität	gut
Spezifische Wirkung	Es erfolgt eine Reduktion des Brennstoffbedarfs (Öl und Gas) durch Einsatz von Strom (Wärmepumpen). Die Nutzenergiebedarfe bleiben konstant. Die THG-Emissionsreduktion (inklusive Energiebereitstellung) durch den Einsatz von Wärmepumpen wird mit ca. 50-60% angenommen.
Anwendungsbereich	Lagertyp: alle. Lagerart: alle. Alter/Sanierungsstand: alle. Beheizung: beheizt.
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Aktuell werden Wärmepumpen nur in einem geringen Umfang in Lagergebäuden eingesetzt. Zurzeit liegt der Anteil bei ca. 3%. Ausbaurate hergeleitet aus (Bundesverband Wärmepumpe e.V., 2022) und (dena, 2021). Eigene Berechnung: Anstieg des Anteils von Wärmepumpen bei Neubauten bis 2025. Ab 2025 nur noch Einbau von Wärmepumpen. Ab 2025 auch zusätzlich Sanierungen mit Nachrüstung von Wärmepumpen. <u>Szenario Min</u> : Anteil Wärmepumpen aller Lagerhallen 16%. <u>Szenario Mittel</u> : Anteil Wärmepumpen aller Lagerhallen 19%. <u>Szenario Max</u> : Anteil Wärmepumpen aller Lagerhallen 22% <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : Anteil Wärmepumpen aller Lagerhallen 100%.

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – mit Vorkette [kt CO_{2eq}/a]	-2.096	-2.510	-2.925	-13.092 (-11,79%)
NO_x – direkt [t/a]	-718	-860	-1.002	-4.485 (-1,88%)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

Photovoltaik auf Lagerhallen

Diese Maßnahme untersucht, welche Strommengen durch die Installation von Photovoltaikanlagen auf Lagerhallen erzeugt werden können. Die erzeugte Strommenge wird dem Strommix des Jahres 2030 gegenübergestellt, um die THG-Reduktionen zu ermitteln.

Tabelle 57 fasst die nötigen Angaben zur Quantifizierung der Maßnahme und ihre Bilanzierungsergebnisse zusammen. Die Bandbreite der Ergebnisse wird bestimmt durch die PV-Fläche auf Logistikimmobilien im Jahr 2030 (20,1 Mio. m² bis 64,5 Mio. m²), die sich aus verschiedenen Annahmen zur erzielbaren Zubaurate ergibt. Da die Technologie bereits verfügbar ist und auch schon über verschiedene fiskalische Anreize gefördert wurde, erscheint der aktuelle Ausbau von Dach PV auf Lagern als auffallend vernachlässigt.

Zu beachten ist, dass als Referenz der deutsche Strommix des Jahres 2030 herangezogen wird. Das heißt, der Strom aus den Photovoltaikanlagen „verdrängt“ diesen Strom. Unterstellt man, dass vor allem Strom aus den verbliebenen fossilen Kraftwerken ersetzt wird, so ergeben sich je nach angenommenem Kraftwerkstyp höhere Minderungen. Demnach kann die Berechnung als konservative Abschätzung erachtet werden.

Tabelle 57: Lagerei: Photovoltaik auf Lagerhallen

Photovoltaik auf Lagerhallen	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Einsatz von erneuerbaren Energien
Datenquellen	Photovoltaik.org (2022): Photovoltaik.org. Hentschel, K.-M. (2020): Handbuch Klimaschutz: wie Deutschland das 1,5-Grad-Ziel einhalten kann. Anlage 20: Flächenbedarf Photovoltaik. oekom, München. Wirth, H. (2022): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE, Freiburg. UBA (2021): Photovoltaik. Umweltbundesamt.
Datenqualität	gut
Spezifische Wirkung	Reduktion des Stromkaufbedarfs durch Eigenproduktion. Für jede erzeugte kWh PV-Strom wird eine Emissionsminderung von 352 g/CO _{2eq} . angenommen.
Anwendungsbereich	Lagertyp: alle. Lagerart: alle. Alter/Sanierungsstand: alle. Beheizung: beheizt und unbeheizt.
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Der aktuelle Ausbau auf Lagern ist unbekannt. Er wird aktuell als gering eingeschätzt. Eigene Annahmen anhand Angaben von Photovoltaik.org (2022): Mittlere Globalstrahlung: 115 W/m ² , Gesamtwirkungsgrad: 17%. Anteil nutzbarer Dachfläche: 50% (Hentschel, 2020). Dachfläche wird hergeleitet über Lagerfläche bei einer angenommenen Geschossanzahl von 1,13. Anteil von Dach-PV am Zubau aus UBA (2021). Anteil von Logistiklagern an PV über Dachflächenanteil von Lagerimmobilien an Gesamtdachfläche. <u>Szenario Min</u> : Halbe Zubaurate ggü. Szenario „Mittel“. PV-Fläche: 20,1 Mio. m ² . <u>Szenario Mittel</u> : Zubaurate abgeleitet aus Wirth (2022). PV-Fläche: 40,2 Mio. m ² . <u>Szenario Max</u> : Alle neuen Gebäude ab 2022 erhalten PV. PV-Fläche: 64,5 Mio. m ² . <u>Theoretisches Maximalpotenzial</u> : Alle Lagerflächen haben eine PV-Anlage (immer nur 50% der Fläche). PV-Fläche = 245,7 Mio. m ² .

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – mit Vorkette [kt CO_{2eq}/a]	-1.219	-2.438	-3.910	-14.898 (-13,41%)

Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

5.5 Internalisierung externer Kosten

Im Kontext der Internalisierung der externen Kosten der Transporte wurde die regulatorische „Anpassung der Lkw-Maut“ untersucht. Hier wird analysiert, welche Wirkungen zum einen die Einführung eines CO₂-Aufschlags auf die Lkw-Maut und zum anderen eine Ausweitung der Maut auf Lkw von 3,5-7,5 t haben könnten. Die Annahmen für die Analyse beruhen auf dem Sachverständigengutachten zur Erstellung des nationalen Luftreinhalteprogramms (Allekotte et al., 2022). In der Berechnung wird eine Doppelbesteuerung ausgeschlossen. Das heißt die zurzeit erhobene CO₂-Steuer (Stand 2023) auf Diesel entfällt für Lkw bei einer äquivalenten Erhebung der Steuer über die Maut. Geht man davon aus, dass sie hier angenommenen CO₂-Preise andernfalls über die gesetzlich bereits etablierte CO₂-Abgabe auf Brennstoffe (BEHG) realisiert würden, so würden lediglich internationale Transporte, die aufgrund des Preises vornehmlich im Ausland tanken, durch den CO₂-Aufschlag auf die Lkw-Maut verteuert werden. Der Anteil dieser im Ausland tankenden Lkw wird auf 12,8 % der Güterverkehrsleistung geschätzt. Diese Abschätzung ergibt sich daraus, dass rund 40 % der Verkehrsleistung in Deutschland grenzüberschreitend ist (Allekotte et al., 2021) und davon ca. 32 % überwiegend im Ausland tanken (eigenes Modell zur Bestimmung des Kraftstoffgrauimports im Rahmen der Zuarbeit für (Henning et al., 2021)²⁷. Bei einem CO₂-Aufschlag von 200 €/t im Jahr 2030 verteuert sich dieser Anteil des Straßengüterverkehrs um ca. 6,5% (eigenes Fahrzeugkostenmodell im Rahmen von (Jöhrens et al., 2022)). Für den Min- und Max-Fall wird eine Verteuierung von 3,3 % bzw. 9,8 % angenommen (dies entspräche einem CO₂-Preis von 100 €/t bzw. 300 €/t). Beim theoretischen Maximalpotenzial wird angenommen, dass der gesamte Güterstraßenverkehr (Lkw >3,5 t) um 9,8 % teurer wird.

Die Verteuierung bei Diesel-Lkw macht zudem den Wechsel zu Elektrofahrzeugen attraktiver. Anhand der vorliegenden Kostenparameter wird vereinfacht angenommen, dass ca. 4 % der verteuerten Lkw-Transporte (12,8 % der Verkehrsleistung, s. o.) durch die Maßnahme von elektrisch betriebenen Lkw durchgeführt werden.

Bei einer Preiselastizität von -0,6 (Repenning, 2021) kommt es zu einer Minderung der Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs in Höhe von insgesamt 0,5 %. Ein Teil dieser Reduktion ist auf die Verlagerung auf Schiene und Binnengewässer zurückzuführen. Hierfür wird eine Kreuzpreiselastizität von 0,3 verwendet (Repenning, 2021). Von der verlagerten Verkehrsleistung entfallen 15 % auf die Binnenschifffahrt und 85 % auf die Bahn (Berechnungen über Astra-D).

Neben der Vermeidung und Verlagerung auf andere Verkehrsträger kommt es durch die Ausweitung der Maut auf Lkw von 3,5-7,5t zu Verlagerungen innerhalb des Straßenverkehrs. Es wird angenommen, dass sich die Verkehrsleistung bzw. Fahrleistung dieser Größenklasse um 20 % reduziert. Diese Fahrleistung wird zu 95 % auf Lkw >7,5t und zu 5% auf LNF verlagert (Berechnungen über Astra-D).

Die angenommenen und in ASTRA-D berechneten Werte sind für den gesamten betrachteten Zeitraum in Tabelle 58 angegeben.

²⁷ Verkehrsleistung von vorwiegend im Ausland tankende Lkw: 40%*32%=12,8%

Tabelle 58: Änderungen an den Transporten durch die Maßnahme „Anpassung Lkw-Maut“

	Min	Mittel	Max	Theoretisches Maximalpot.
CO ₂ -Aufschlag	100 €/t	200 €/t	300 €/t	300 €/t
Verteuerung der Transportkosten	3,3% ¹	6,5% ¹	9,8% ¹	9,8%
Anteil an Verkehrsleistung (VL), die durch Verteuerung betroffen ist	12,8% ²	12,8% ²	12,8% ²	100%
Anteil BEV an VL von Lkw	3,7%	4,0%	4,2%	9,1%
Reduktion VL von Lkw>26t ³	1.264 Mio. tkm	2.528 Mio. tkm	3.792 Mio. tkm	29.398 Mio. tkm
VL-Verlagerung Lkw>26t auf Bahn	537 Mio. tkm	1.075 Mio. tkm	1.612 Mio. tkm	12.494 Mio. tkm
VL-Verlagerung Lkw>26t auf Schiff	95 Mio. tkm	190 Mio. tkm	284 Mio. tkm	2.205 Mio. tkm
Reduktion VL von Lkw 3,5-12t	2.745 Mio. tkm	2.745 Mio. tkm	2.745 Mio. tkm	2.745 Mio. tkm
Erhöhung VL von Lkw 12-26t	2.607 Mio. tkm	2.607 Mio. tkm	2.607 Mio. tkm	2.607 Mio. tkm
Erhöhung VL von LNF	137 Mio. tkm	137 Mio. tkm	137 Mio. tkm	137 Mio. tkm

Anmerkungen: ¹Gilt nur für 12,8% der Verkehrsleistung (internationale Verkehre, die überwiegend im Ausland tanken). ²40% der Straßenverkehrsleistung sind internationale Verkehre, wobei 32% hiervon aufgrund von Kostenvorteilen überwiegend im Ausland tanken. Daher verteuert sich der Transport durch die Bemautung statt Kraftstoffsteuer nur für 40%*32%=12,8% der Verkehre. ³Die Änderungen der Verkehrsleistung beinhaltet sowohl die Vermeidung als auch die Verlagerung auf Bahn und Schiff.

Im folgenden Steckbrief wird die Maßnahme zusammengefasst, und es werden die Minderungspotenziale für das Jahr 2030 angegeben.

Tabelle 59: Anpassung Lkw-Maut

Anpassung Lkw-Maut	
Zugrundeliegende Maßnahmen aus Longlist	Einführung & Ausweitung von Gebühren für Straßennutzung, Bahntrassen und Häfen [55]
Datenquelle	(Allekotte et al., 2022)
Datenqualität	gut
Spezifische Wirkung	Die Verteuerung von Diesel-Lkw und von Lkw 3,5-7,5t führt zu: Vermeidung von Lkw-Fahrten. Verlagerung vom Lkw auf Bahn und Binnenschiff. Verlagerung von Lkw-Fahrten 3,5-7,5t auf Fahrten von LNF und Lkw 12-26t. Erhöhung des Elektroanteils an der Fahrleistung von Lkw durch Mautspreizung.
Anwendungsbereich	Güterabteilungen: alle. Straßenverkehr: Vermeidung und Verlagerung auf Bahn und Schiff: SNF >26t, internationale Verkehre. Verlagerung auf andere Größenklassen: Lkw 3,5-7,5t, nationale und internationale Verkehre. Erhöhung des Elektroanteils: alle SNF
Potentialabschätzung	<u>Baseline</u> : Der CO ₂ -Aufschlag auf die Maut sowie die Ausweitung der Maut auf Lkw 3,5-7,5t ist für das Jahr 2024 geplant. <u>Szenarioannahmen</u> : siehe Tabelle 58

Bilanzergebnisse: Vermeidung von Emissionen

	<i>Min</i>	<i>Mittel</i>	<i>Max</i>	<i>Theoretisches Maximalpotenzial¹</i>
THG – WTW [kt CO_{2eq}/a]	-306	-401	-496	-2.415 (-2,17 %)
NO_x – TTW [t/a]	-142	-294	-517	-4.919 (-2,06%)

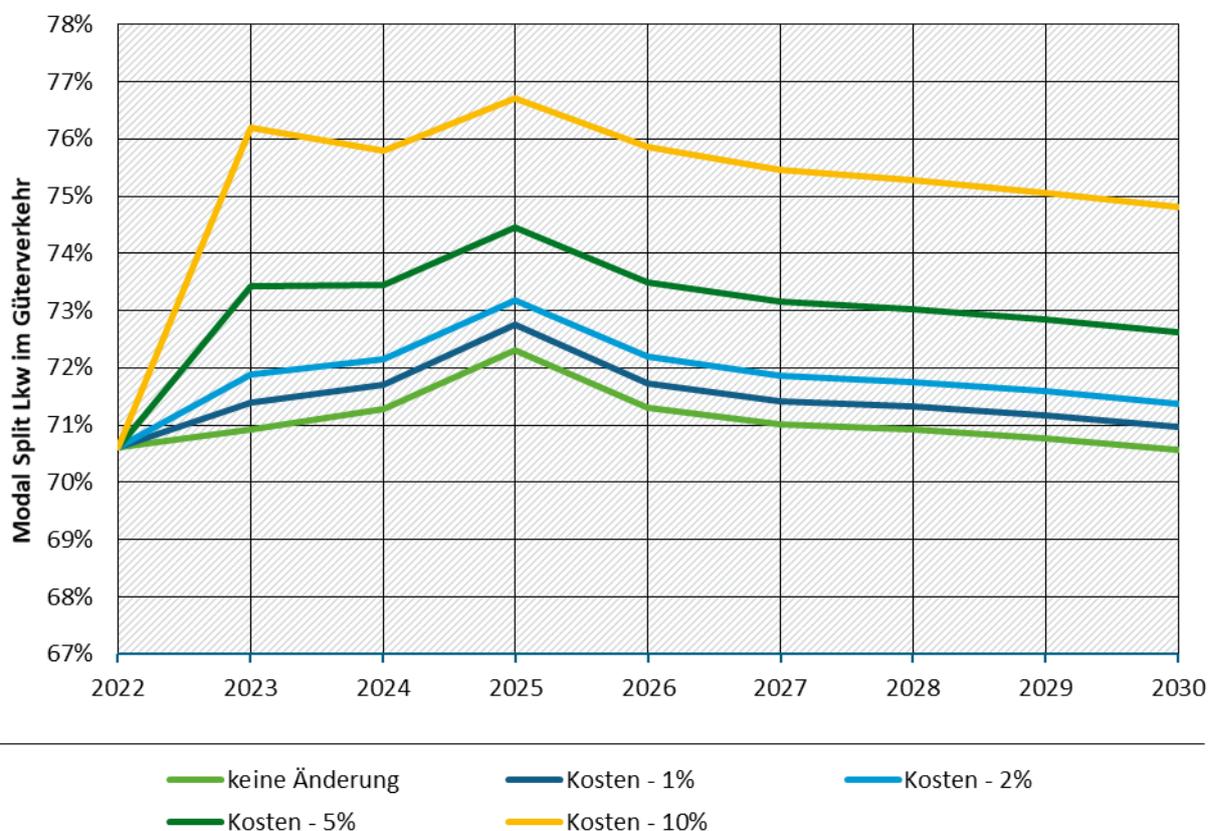
Anmerkung: ¹Prozentangabe gibt Verhältnis von Vermeidung zu Gesamtemissionen des Güterverkehrs und der Lagerei an.

5.6 Mögliche Rebound-Effekte

Effizienzsteigerungen im Güterverkehr durch effizientere Fahrzeuge, höhere Auslastung oder optimierte Routenführung können dazu führen, dass Gütertransporte günstiger und somit wiederum attraktiver werden. Die damit eingehende Steigerung des Güterverkehrs kann die Emissionsreduktion durch die gesteigerte Effizienz teilweise oder sogar ganz kompensieren. Solche gegenläufigen Effekte sind bereits auch anderen Bereichen bekannt und werden als Rebound-Effekt bezeichnet.

Ebenso können auch Effizienzsteigerungen im Straßengüterverkehr dazu führen, dass dessen Modal Share zugunsten emissionsärmerer Transportmodi steigt. Um dies zu quantifizieren, wurde mit dem Astra-D-Modell eine Kostensenkung im Straßengüterverkehr simuliert. In Abbildung 43 sind die Effekte von Effizienzsteigerungen im Straßengüterverkehr exemplarisch dargestellt.

Abbildung 43: Effekte von Effizienzsteigerungen von Lkw auf den Modal Split



Quellen: eigene Darstellung; Berechnung des Modal Splits mittels Astra-Modell. Modelliert wurde jeweils eine einmalige dauerhafte Effizienzsteigerung zum Jahr 2023 für leichte und schwere Lkw.

Zur Bestimmung des Rebound-Effekts werden spezifische Energieeinsparungen angenommen und diese an das ASTRA-Modell übergeben. Die sonstigen Randbedingungen bleiben bestehen. Eine zehnprozentige Reduktion des Dieserverbrauchs von Lkw bewirkt somit eine Minderung der Energiebezugskosten. Durch die Verringerung der Transportkosten auf der Straße kommt es zu Verlagerungen von Bahn und Schiff auf den Lkw. Im Modell wurden Effizienzsteigerungen im Bereich von 1 % bis 50 % angenommen. Hieraus erhält man die folgenden Verkehrsleistungsänderungen.

Tabelle 60: Änderungen bei der Verkehrsleistung durch Effizienzsteigerungen beim Lkw

Effizienzsteigerung	LNf & SNf <12t	SNf 12-26t	SNf >26t	Bahn	Binnenschiff
Ausgangszust.:	37,4 Mrd. tkm	23,3 Mrd. tkm	500,4 Mrd. tkm	182,0 Mrd. tkm	65,0 Mrd. tkm
1%	0,4 Mrd. tkm	0,1 Mrd. tkm	1,5 Mrd. tkm	-3,1 Mrd. tkm	-0,5 Mrd. tkm
2%	0,7 Mrd. tkm	0,1 Mrd. tkm	3,1 Mrd. tkm	-6,3 Mrd. tkm	-1,0 Mrd. tkm
5%	1,8 Mrd. tkm	0,4 Mrd. tkm	7,7 Mrd. tkm	-16,0 Mrd. tkm	-2,3 Mrd. tkm
10%	3,8 Mrd. tkm	0,7 Mrd. tkm	15,5 Mrd. tkm	-33,3 Mrd. tkm	-4,3 Mrd. tkm
20%	8,8 Mrd. tkm	1,6 Mrd. tkm	34,2 Mrd. tkm	-76,4 Mrd. tkm	-7,6 Mrd. tkm
50%	28,1 Mrd. tkm	2,4 Mrd. tkm	51,3 Mrd. tkm	-133,5 Mrd. tkm	-14,9 Mrd. tkm

Quelle: Berechnung des Modal Splits mittels Astra-Modell. Modelliert wurde jeweils eine einmalige dauerhafte Effizienzsteigerung zum Jahr 2023 für leichte und schwere Lkw.

In der folgenden Tabelle werden zwei Fälle dargestellt. Zum einen werden die THG-Reduktionen angegeben, die sich ergeben würden, wenn es zu den Effizienzsteigerungen bei den Lkw kommen würde, aber dies keinen Einfluss auf den Modal-Split hätte (Fall „Ohne Rebound-Effekt“). Zum anderen wird der Fall mit den genannten Effizienzsteigerungen und den in Tabelle 60 aufgezeigten Verlagerungen dargestellt (Fall „Mit Rebound-Effekt“).

Tabelle 61: Rebound-Effekt durch Effizienzsteigerungen beim Lkw

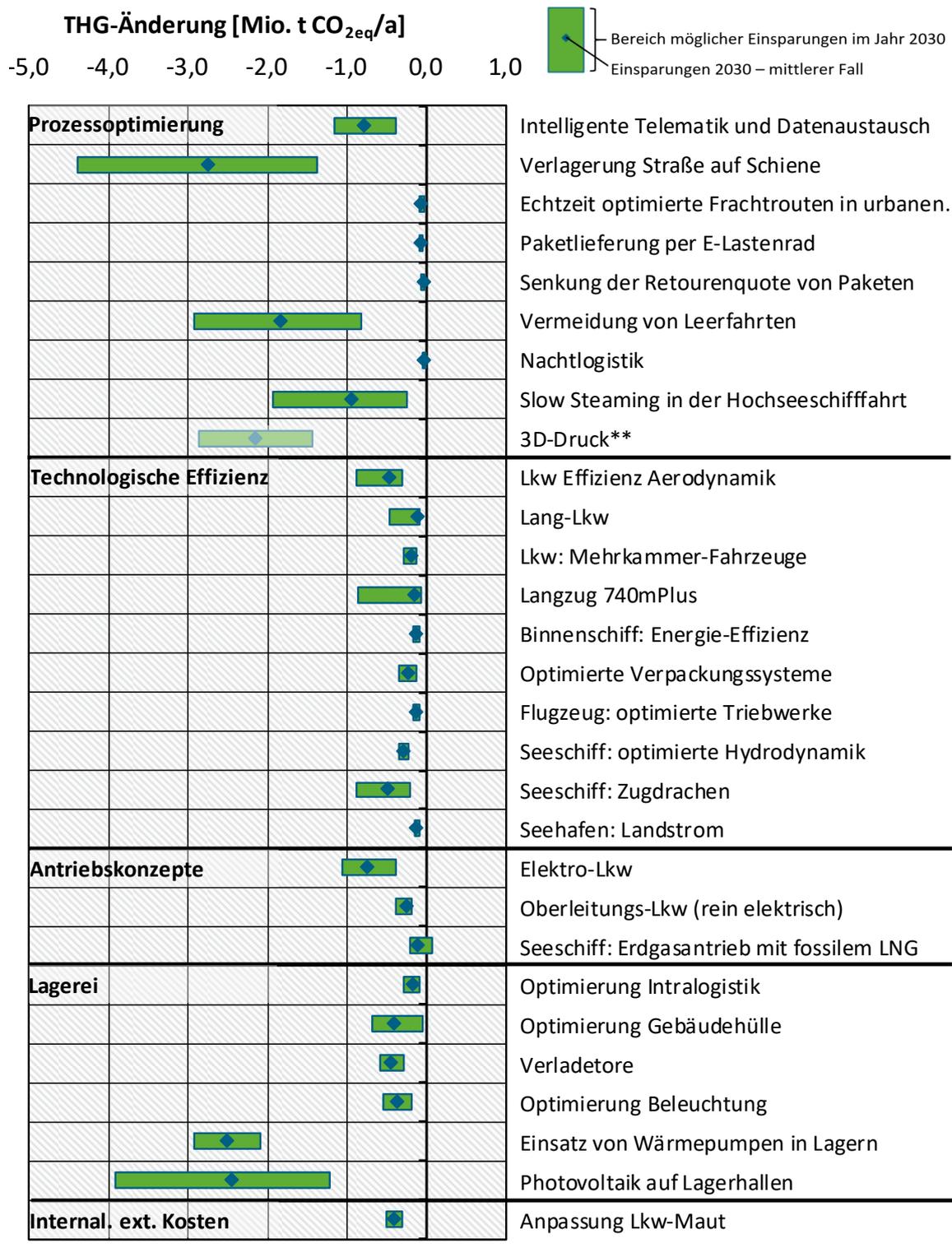
Effizienzsteigerung beim Lkw	THG-Einsparung im Fall „Ohne Rebound-Effekt“	THG-Einsparung im Fall „Mit Rebound-Effekt“	Minderung der THG-Einsparung durch Rebound-Effekt
1%	0,6 Mio. t CO _{2eq}	0,4 Mio. t CO _{2eq}	38%
2%	1,2 Mio. t CO _{2eq}	0,7 Mio. t CO _{2eq}	38%
5%	3,0 Mio. t CO _{2eq}	1,9 Mio. t CO _{2eq}	37%
10%	6,0 Mio. t CO _{2eq}	3,9 Mio. t CO _{2eq}	36%
20%	12,1 Mio. t CO _{2eq}	7,9 Mio. t CO _{2eq}	34%
50%	30,2 Mio. t CO _{2eq}	23,8 Mio. t CO _{2eq}	21%

Die höhere Verkehrsleistung auf der Straße verringern somit die Emissionsminderungen durch die Effizienzsteigerung um ca. 20-40 %.

5.7 Gesamtübersicht und Fazit zur Wirkungsquantifizierung

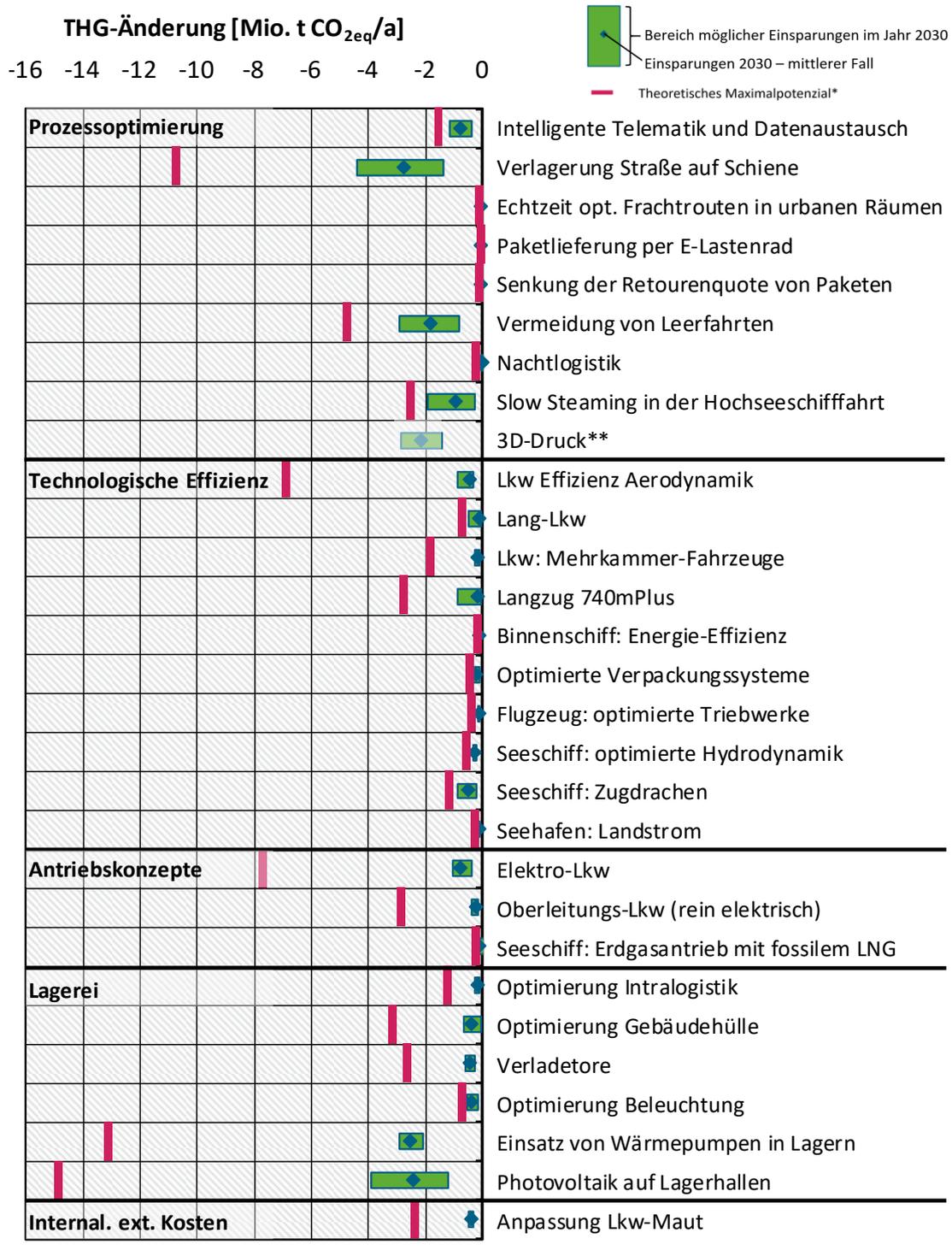
Die Ergebnisse aus der Quantifizierung der betrachteten Maßnahmen aller Handlungsfelder sind in Abbildung 44 und Abbildung 45 (THG-Emissionen) sowie Abbildung 46 und Abbildung 47 (NO_x-Emissionen) zusammengefasst.

Abbildung 44: THG-Vermeidung – Gesamtübersicht alle Maßnahmen (WTW)



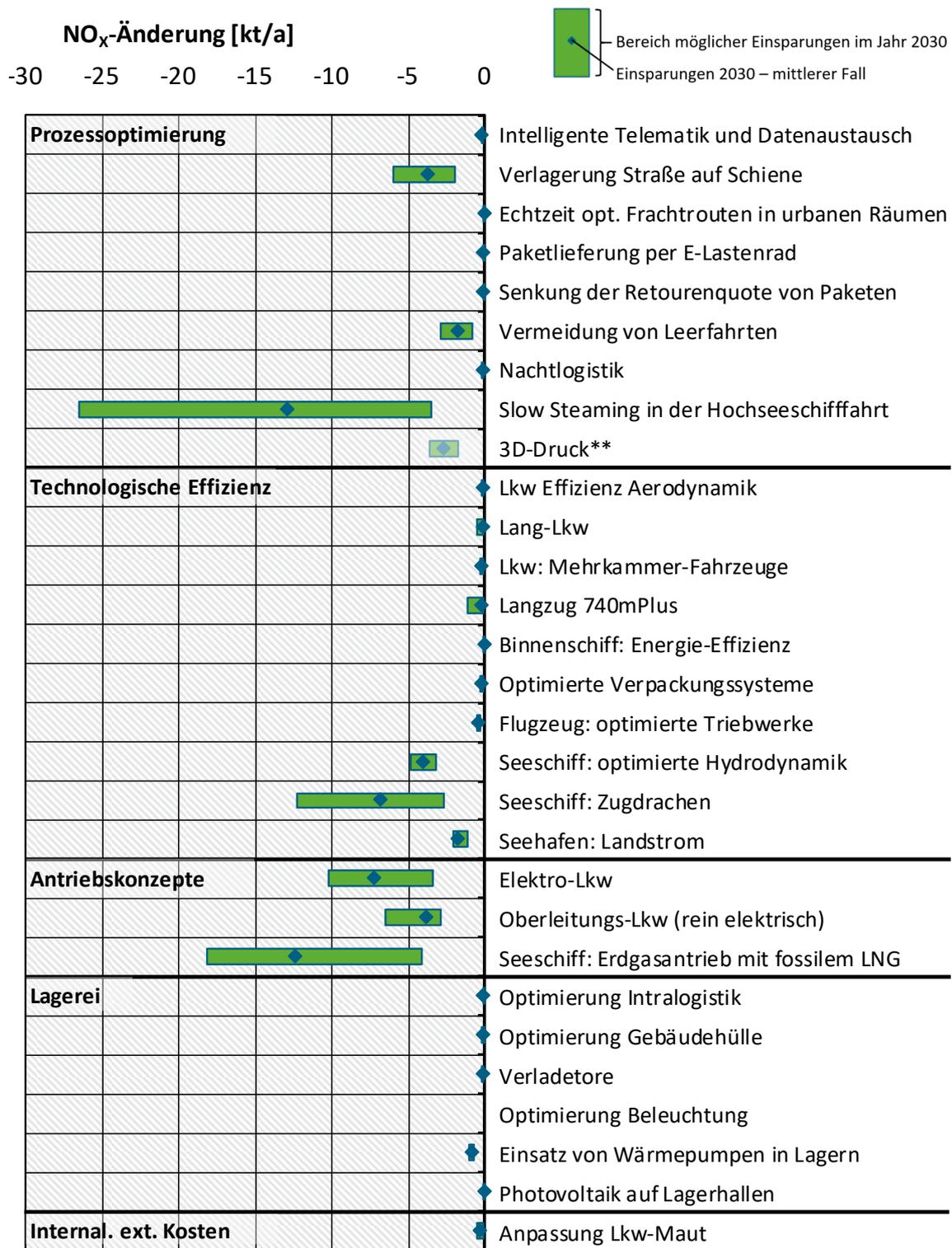
Quellen: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkung: *Beim theoretischen Maximalpotenzial werden die Emissionsfaktoren und Verkehrsmengen des Jahres 2030 herangezogen. **Beim 3D-Druck sind lediglich die möglichen Auswirkungen auf den Transport und nicht auf die Produktion bilanziert. Die aus der Produktion resultierenden Emissionen könnten bei dezentralen Druckvorgängen höher sein als die zentrale Produktion zzgl. Lieferung.

Abbildung 45: THG-Vermeidung – Gesamtübersicht alle Maßnahmen inkl. theoretisches Maximalpotenzial (WTW)



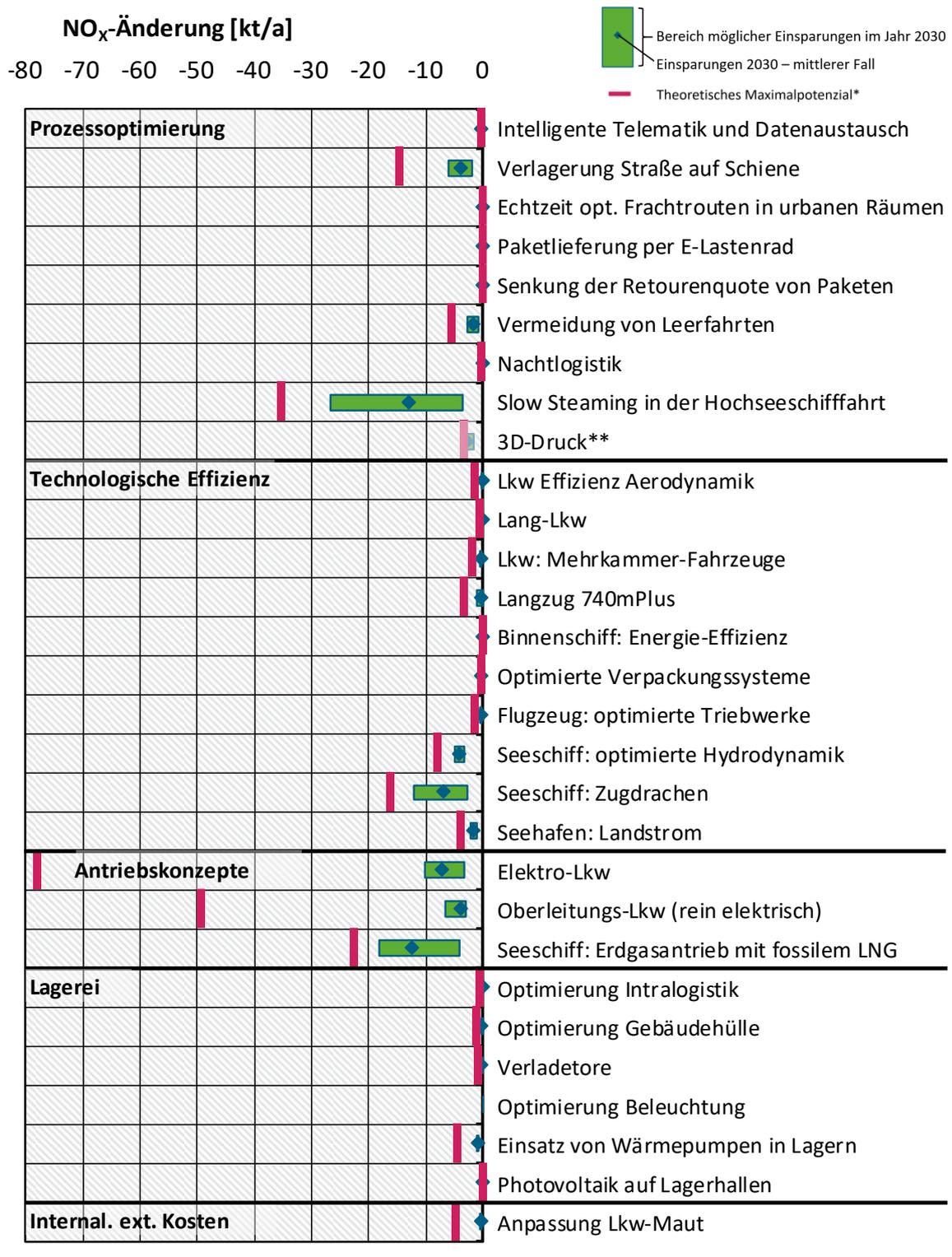
Quellen: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkung: *Beim theoretischen Maximalpotenzial werden die Emissionsfaktoren und Verkehrsmengen des Jahres 2030 herangezogen. **Beim 3D-Druck sind lediglich die möglichen Auswirkungen auf den Transport und nicht auf die Produktion bilanziert. Die aus der Produktion resultierenden Emissionen könnten bei dezentralen Druckvorgängen höher sein als die zentrale Produktion zzgl. Lieferung.

Abbildung 46: NO_x-Vermeidung – Gesamtübersicht alle Maßnahmen (TTW)



Quellen: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkung: *Beim theoretischen Maximalpotenzial werden die Emissionsfaktoren und Verkehrsmengen des Jahres 2030 herangezogen. **Beim 3D-Druck sind lediglich die möglichen Auswirkungen auf den Transport und nicht auf die Produktion bilanziert. Die aus der Produktion resultierenden Emissionen könnten bei dezentralen Druckvorgängen höher sein als die zentrale Produktion zzgl. Lieferung.

Abbildung 47: NO_x-Vermeidung – Gesamtübersicht alle Maßnahmen inkl. theoretisches Maximalpotenzial (TTW)



Quellen: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkung: *Beim theoretischen Maximalpotenzial werden die Emissionsfaktoren und Verkehrsmengen des Jahres 2030 herangezogen. **Beim 3D-Druck sind lediglich die möglichen Auswirkungen auf den Transport und nicht auf die Produktion bilanziert. Die aus der Produktion resultierenden Emissionen könnten bei dezentralen Druckvorgängen höher sein als die zentrale Produktion zzgl. Lieferung.

In der Gesamtschau ist Folgendes festzustellen:

- ▶ Zwischen den betrachteten Maßnahmen zeigt sich bei den THG-Einsparpotentialen eine Bandbreite von zum Teil mehreren Größenordnungen. Dies geht neben unterschiedlichen spezifischen Einsparpotentialen vor allem darauf zurück, dass sich die potentiellen Wirkungsbereiche der Maßnahmen stark unterscheiden. So wirken einige Maßnahmen beispielsweise potentiell auf die gesamte Lkw-Flotte in Deutschland, während andere nur ein bestimmtes Segment innerhalb der urbanen Logistik adressieren.
- ▶ Die Quantifizierung der THG-Einsparpotentiale einzelner Maßnahmen ist in vielen Fällen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Trotz der vorgenannten großen Unterschiede in den berechneten Wirkungspotentialen lassen sich aber dennoch robuste Schlussfolgerungen aus der Quantifizierung ziehen.
- ▶ Die mit Abstand höchsten THG-Einsparpotentiale im Transportbereich ergeben sich aus dem Verlagerungspotential von der Straße auf die Schiene (max. 4,4 Mio. t CO_{2eq}-Reduktion) sowie aus dem Potential zur Vermeidung von Lkw-Leerfahrten (max. 2,9 Mio. t CO_{2eq}-Reduktion).
 - Die Verlagerung auf die Schiene ist vor allem durch infrastrukturelle Restriktionen begrenzt, kann aber auch stark von digitalen Innovationen profitieren. Die positiven Effekte einer Verlagerung sind seit langem bekannt und vielfach in Studien diskutiert. Ein wirklich tiefgreifender Wandel hin zu einer Multimodalität in der Breite des Güterverkehrs bedarf einer grundlegenden Neuausrichtung der deutschen/europäischen Verkehrspolitik mit einer prioritären Förderung der schienengebundenen Güterverkehrsinfrastruktur.
 - Der Anteil an Leerfahrten im Güterverkehr liegt derzeit im europäischen Mittelfeld. Die Gründe für den hohen Leerfahrtenanteil sind vielschichtig. Dazu zählen auf der einen Seite eine häufige wettbewerbsbedingte Zurückhaltung bei der Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Logistikern, die kleinteilige Struktur der Transportbranche sowie die in Deutschland im internationalen Vergleich eher schleppende Digitalisierung. Weiterhin haben technische Anforderungen an den Transport, wie ein bestimmter Aufliegertyp, Einfluss auf den flexiblen Einsatz. Die Digitalisierung von Prozessen und verstärkte Kooperation unter den Logistikern könnte beispielsweise die Nutzung von Frachtenbörsen begünstigen, um Potentiale zur Auslastungsoptimierung zu heben.
- ▶ Im Bereich der Logistikimmobilien liegen die größten THG-Minderungspotentiale im Zeithorizont 2030 im Einsatz von Wärmepumpen (max. 2,9 Mio. t CO_{2eq}-Reduktion) sowie der Installation von Photovoltaikanlagen (max. 3,9 Mio. t CO_{2eq}-Reduktion) auf Logistikimmobilien. Wenn diese Technologien langfristig in weiten Teilen der Logistikimmobilien eingesetzt werden, können diese bilanziell energiepositiv werden. Beim Ausbau der Photovoltaik ergeben sich zudem starke Synergien mit der Einführung elektrischer Lkw (Lkw könnten auf diese Weise günstig mit erneuerbarem Strom versorgt werden, was ihre Einführung deutlich beschleunigen könnte).
- ▶ Die Einführung elektrischer Antriebe (BEV und Oberleitungs-Lkw) im Lkw-Bereich birgt vor allem langfristig erhebliches Klimaschutzpotential. Mittelfristig ist das Potential durch die begrenzte Geschwindigkeit der Flottenumschichtung sowie der Energiewende im Stromsektor²⁸ begrenzt, so dass im Zeithorizont 2030 nur etwa 1,4 Mio. t CO_{2eq} WTW (10,5

²⁸ Unter der hier getätigten Annahme des Strommixes 2030 mit einem Emissionsfaktor von 352 g CO_{2eq}/kWh ergibt sich in diesem Zeithorizont eine THG-Einsparung durch Elektro-Lkw gegenüber Diesel-Lkw von ca. 50 %.

Mio. t CO_{2eq} TTW) eingespart werden können. Elektromobilität sollte für die Logistik zumindest mittelfristig daher nicht als einzige Lösung verstanden werden.

- ▶ Der Bereich der fahrzeugseitigen Effizienz im Straßengüterverkehr enthält viele Einzelmaßnahmen, die jeweils für sich genommen nur vergleichsweise geringes THG-Minderungspotential aufweisen. Auch die Summe der Potentiale in diesem Bereich liegt deutlich hinter den anderen Bereichen. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass in der jüngsten Vergangenheit die Fahrwiderstände bereits deutlich verringert worden sind und somit das Potenzial auch schon deutlich ausgeschöpft ist. Für Effizienzmaßnahmen bei Schienenfahrzeugen und Schiffen konnte im Vergleich ein deutlich höheres Einsparpotenzial ermittelt werden.
- ▶ Bei Effizienzmaßnahmen, die die Betriebskosten vermindern, muss jedoch auch der Rebound-Effekt berücksichtigt werden: Die Kostenminderung pro Kilometer führt hierbei zu einem Anstieg der Fahrleistung. Den Ergebnissen zufolge verringern sich THG-Einsparungen durch dieselsparende Fahrzeugtechnologie um 20-40 %, wenn der Rebound-Effekt berücksichtigt wird.
- ▶ Konzepte im Bereich der Citylogistik (Einsatz von Lastenrädern, Nachtlogistik) zielen primär auf die Reduktion von Luftschadstoffemissionen und Lärm in Innenstädten) und haben hierbei erhebliches Potential. Für die Reduktion von THG spielen sie allerdings nur eine untergeordnete Rolle.

Für die mittelfristige Dekarbonisierung des Seeschiff- und Flugverkehrs stehen derzeit alternative Kraftstoffe (biogen sowie strombasiert) im Zentrum der Diskussion. Die mittelfristige Verfügbarkeit solcher Kraftstoffe, ihre künftigen Preise sowie ihre Emissionsbilanz über den Lebenszyklus sind aktuell hochgradig unsicher und primär von Faktoren außerhalb der Logistik abhängig (geopolitische Entwicklungen, regulatorische Randbedingungen in Deutschland und Europa). Aufgrund dieser Unsicherheiten wurde in diesem Projekt davon abgesehen, Emissionsminderungspotentiale durch den Einsatz erneuerbarer Kraftstoffe zu quantifizieren.

Es gibt bei einigen Maßnahmen (insbesondere fahrzeugseitige Effizienzmaßnahmen und Einsatz digitaler Lösungen zur Reduktion des Fahrzeugenergieverbrauchs) eine hohe Unsicherheit bezüglich deren aktueller Verbreitung (Baseline), so dass auch die berechneten Potentiale in diesen Fällen mit zusätzlicher Unsicherheit behaftet sind.

Die hypothetische Kombination aller Maßnahmen (jeweils in Ausprägung „Max“) ergibt ein THG-Minderungspotential von ca. 18,3 Mio. t CO_{2eq} im Güterverkehr und 8,9 Mio. t CO_{2eq} bei den Logistikimmobilien (Abbildung 48), zusammen also 27,2 Mio. t CO_{2eq}. Das entspricht einer THG-Minderung gegenüber dem Referenzszenario für das Jahr 2030 um etwa 24 %. Direkte NO_x-Emissionen könnten um bis zu 81 kt reduziert werden, das Gros davon entfällt auf die Seeschifffahrt. Die für die Luftqualität in bewohnten Gebieten relevanten Verkehrsträger Straße, Schiene und Binnengewässer weisen eine maximale Reduktion von 27 kt NO_x auf. Die vorgenannte Abschätzung der kombinierten Wirkung aller Maßnahmen hat hypothetischen Charakter und gibt einen Hinweis, in welcher Größenordnung prinzipiell Minderungen möglich wären, wenn sehr schnell sehr ambitionierte Maßnahmen ergriffen würden. Selbst in diesem Falle wäre es aufgrund des langen Vorlaufs vieler Maßnahmen allerdings unwahrscheinlich, dass solche THG-Minderungen bis zum Jahr 2030 erzielt werden könnten. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Annahmen zu den Einzelpotenzialen von Maßnahmen teilweise mit hohen Unsicherheiten belegt sind. Zudem können in der Zukunft heute nicht quantifizierbare

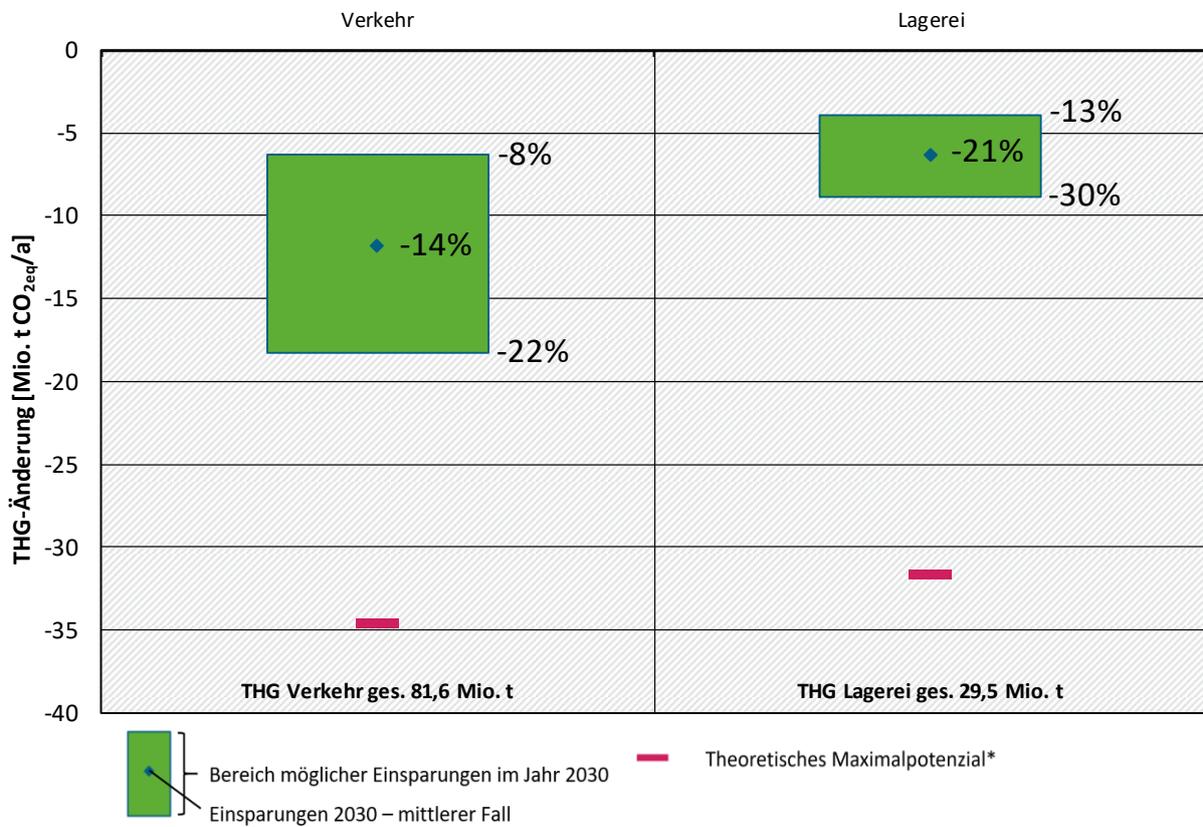
Entwicklungen eintreten, die die errechneten Potenziale ändern können (z. B. Rebound-Effekte, siehe Abschnitt 5.6). Mit Blick auf die kommenden Jahre bis 2030 können auch derzeit laufende Gesetzgebungsverfahren erhebliche Auswirkungen auf die Wirksamkeit bzw. Umsetzbarkeit einzelner Maßnahmenbereiche haben. So könnten sich auch dem Greening-Freight-Paket der EU-Kommission beispielsweise relevante Verschiebungen bei der wettbewerblichen Ausgangsposition der Verkehrsträger Straße und Schiene ergeben.

Für die oben dargelegte Gesamtabschätzung wurden grundlegende Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Maßnahmen berücksichtigt. Ein Beispiel für eine solche Wechselwirkung ist der Einsatz von Batterie-Lkw und gleichzeitig eine Reduktion der Lkw-Fahrleistung auf der Straße. So sind bspw. die absoluten Minderungspotenziale durch Vermeidung von Verkehren bei einer dieselbetriebenen Lkw-Flotte höher als bei einer elektrisch betriebenen. Das errechnete Gesamtpotenzial unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen ist somit ein Drittel niedriger als die Summe der Einzelpotenziale. Darüber hinaus sind in der Praxis weitere Wechselwirkungen zu erwarten, die auf der hier gewählten Betrachtungsebene nicht quantifiziert werden können.

Abbildung 48: THG Vermeidung für Verkehr und Lagerei bei Berücksichtigung aller Maßnahmen

THG Vermeidung WTW

Mio. t CO_{2eq} pro Jahr



Quellen: Eigene Darstellung (ifeu).

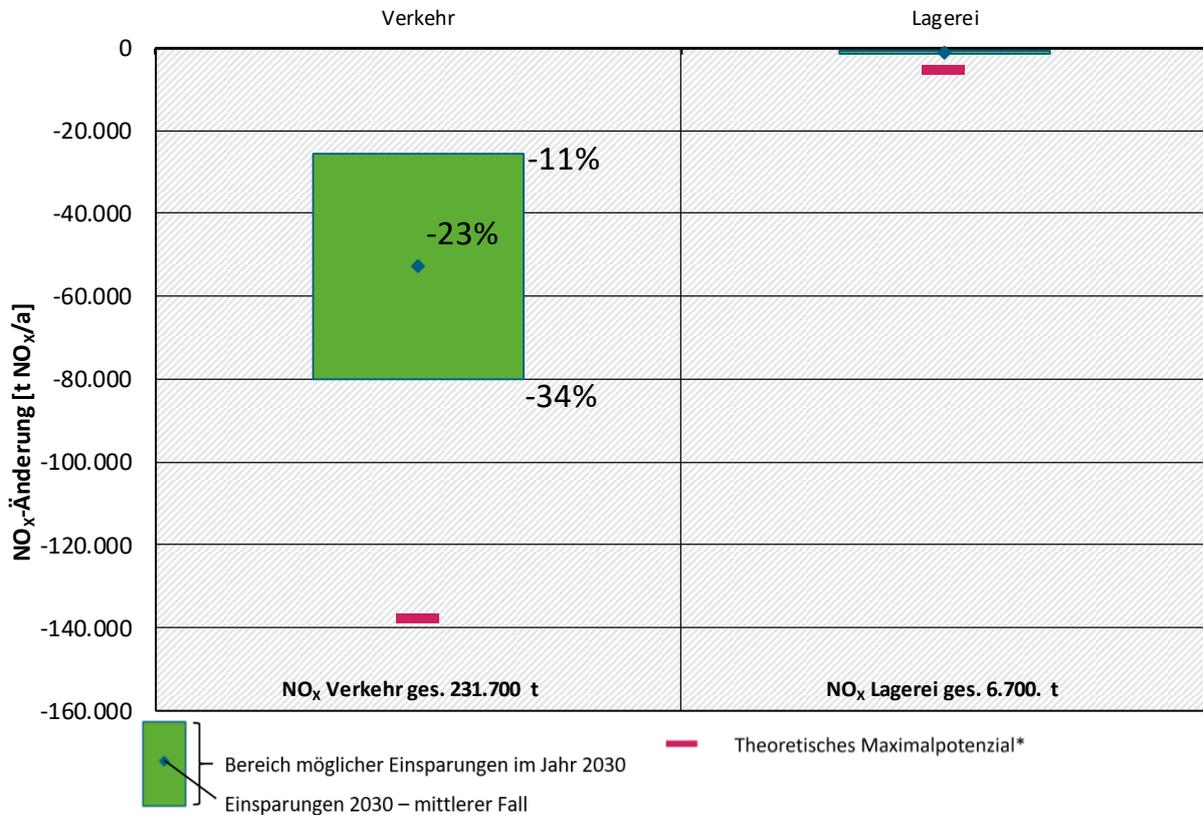
Anmerkung: Bilanzgrenzen: Straße, Binnengewässer, Schiene und Lagerei: Territorialprinzip; Seeschifffahrt: 50 % der gesamten Emissionen aus Im- und Exporten; Flugverkehr: Gesamtemissionen von Flügen mit Start in Deutschland.

*Beim theoretischen Maximalpotenzial werden die Emissionsfaktoren und Verkehrsmengen des Jahres 2030 herangezogen. Der 3D-Druck ist im Bereich Verkehr mitberücksichtigt. Die Maßnahme „Langzug 740Plus“ ist bereits in der Maßnahme „Verlagerung Straße auf Schiene“ berücksichtigt.

Abbildung 49: NO_x Vermeidung für Verkehr und Lagerei bei Berücksichtigung aller Maßnahmen

NO_x Vermeidung TTW

t NO_x pro Jahr



Quellen: Eigene Darstellung (ifeu). Anmerkung* Beim theoretischen Maximalpotenzial werden die Emissionsfaktoren und Verkehrsmengen des Jahres 2030 herangezogen. Der 3D-Druck ist im Bereich Verkehr mitberücksichtigt. Die Maßnahme „Langzug 740Plus“ ist bereits in der Maßnahme „Verlagerung Straße auf Schiene“ berücksichtigt.

6 Maßnahmensteckbriefe

6.1 Effizienz Antrieb/Fahrzeug

Ebene 2: Lkw-Effizienz

1 | Seitenverkleidung Lkw-Auflieger

Seitenverkleidungen am unteren Teil des Aufliegers verringern Verwirbelungen und den Luftwiderstand deutlich, indem der Spalt zwischen Zugmaschine und Auflieger verringert werden kann. Diese sollen den Raum unterhalb des Aufliegers verdecken und verlängern die Seitenfläche hin zum Boden. Die so sinkenden Cw-Werte führen zu einem sinkenden Kraftstoffverbrauch und somit positiven Auswirkungen auf die THG-Emissionen.

Auswirkung auf Fahrzeuggeometrie und Fahrzeugeffizienz

Umweltwirkung	Sinkender Kraftstoffverbrauch, dadurch sinkender CO ₂ -Ausstoß des Fahrzeuges durch geringeren Luftwiderstand
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister, Verlader mit eigener Lkw-Flotte
-------------------------	--

Zeithorizont	kurzfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: spezifisches Anwendungsspektrum
-----------------------	--

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangabe:

Frasquet, C., Indinger, T. (2013): Numerische Untersuchungen zur Aerodynamik von Nutzfahrzeugkombinationen bei realitätsnahen Fahrbedingungen unter Seitenwindeinfluss. FAT-Schriftenreihe 260, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., Berlin, S. 40ff.

2 | Automatisierte und vernetzte Fahrzeuge

Transportfahrzeuge werden durch autonome und ferngesteuerte Fahrzeuge ersetzt und so besonders finanzielle Einsparungen realisiert. Die freigewordenen Mittel können in umweltschützende Maßnahmen re-investiert und die negativen Umweltwirkungen des Transports so gesenkt werden.

Auswirkung auf Fahrzeugeffizienz

Umweltwirkung	Effizienzsteigerung durch optimierte Fahrtraster und Auslastungen. Monetäre Einsparungen können in Umweltmaßnahmen reinvestiert werden.
---------------	---

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister, Verlader mit eigener Lkw-Flotte
-------------------------	--

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: hohes Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangabe:

ALICE (2019): A framework and process for the development of a roadmap towards zero emissions logistics 2050

3 | Abgeschrägtes Heck und Winglets am Lkw-Auflieger

Ein abgeschrägtes Heck bzw. die Anbringung eines Heckklappensystems am Ende des Aufliegers verbessert die Aerodynamik deutlich. Die Winglets reduzieren die am Heck entstehenden Verwirbelungen und optimieren die Luftströmung, was zu einem geringeren Luftwiderstand und geringeren Kraftstoffverbrauch führt.

Auswirkung auf Fahrzeuggeometrie und Fahrzeugeffizienz

Umweltwirkung	Sinkender Kraftstoffverbrauch durch geringeren Luftwiderstand und Verringerung der Sogwirkung am Heck. Je nach Grad der Schrägströmung konnte in Feldversuchen eine Verringerung des cw-Wertes um 5,62-6,5% erreicht werden.
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister, Verlader mit eigener Lkw-Flotte
-------------------------	--

Zeithorizont	kurzfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: mittleres Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangabe:
 Frasquet, C., Indinger, T. (2013): Numerische Untersuchungen zur Aerodynamik von Nutzfahrzeugkombinationen bei realitätsnahen Fahrbedingungen unter Seitenwindeinfluss. FAT-Schriftenreihe 260, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., Berlin, S. 35ff.

Ebene 2: Green Shipping

4 | Klimaneutrale Versandoptionen (Green Shipping, Clean Cargo)

Kombination aus umweltschonenden Maßnahmen, die langfristig die Umweltwirkungen des Transports reduzieren. Dabei können sowohl Alternative Antriebsarten, Effizienzsteigerungen oder Prozessoptimierungen eine Rolle spielen. Dies kann sowohl aus einem internen Antrieb der Logistiker erfolgen, aber auch durch Regulierungen und Vorschriften erzwungen werden.

Auswirkung auf Modal Split, kombinierten Verkehr, effiziente Lagerverwaltung und Nachhaltigkeitskriterien bei der Auswahl von Partnern

Umweltwirkung	Reduktion von CO ₂ -Emissionen durch Einsatz klimaneutraler Versandlösungen
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister, Staat
-------------------------	------------------------------

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport & Beschaffung	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangabe:
 Deckert, C. (2016): CSR und Logistik - Spannungsfelder Green Logistics und City-Logistik. Springer Verlag

Ebene 2: Lkw-Ladefläche

5 | Lang-Lkw

Der Einsatz von Lang-Lkws wird momentan in mehreren Feldversuchen und im Realbetrieb untersucht. Hierbei werden Lkws eingesetzt, die über deutlich längere Ladeflächen verfügen und durch größere Ladungen eine höhere Transporteffizienz generieren können. Dabei kann auch die Gesamtzahl der eingesetzten Lkws reduziert werden.

Auswirkung auf Fahrzeuggeometrie und Fahrzeugeffizienz

Umweltwirkung	Steigerung der Transporteffizienz und Wegfall von Fahrten (Transporteffizienz: +15-25%; je nach Quelle Kraftstoffverbrauch +12% pro Fahrzeugkilometer bei Reduktion der Fahrleistung um 33% (gemessen an Fahrzeugkilometern) und CO ₂ -Emissionen: -15%
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister, Verlader mit eigener Lkw-Flotte
-------------------------	--

Zeithorizont	mittelfristig
--------------	---------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: mittleres Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Regional- und Fernverkehr
---	---

Literaturangabe:

Irzik, M. (2017): Feldversuch mit Lang-Lkw in Deutschland. Bundesanstalt für Straßenwesen

6 | Anpassung Lkw in Mehrkammer-Fahrzeuge

Die Ladefläche von Lkw wird mithilfe eines Mehrkammersystems in unterschiedliche Temperaturzonen eingeteilt. Somit können gleichzeitig mehrere Arten von Ladung transportiert und die Anzahl von Fahrten reduziert werden. Die Einteilung der Kammern kann dabei flexibel und volumenabhängig erfolgen.

Auswirkung auf Fahrzeugauslastung, Routenoptimierung, Verminderung von Fahrten und Transportbündelung

Umweltwirkung	Verringerung der gefahrenen Kilometer durch gleichzeitige Lieferung mehrerer Sortimentsbereiche (Bsp.: Lekkerland Reduktion um 2.000t CO ₂ /Jahr; Reduktion der Fahrzeugkilometer um -3,4 Mio. km bei 160 Lkw)
---------------	---

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister, Verlader mit eigener Lkw-Flotte. Besonders interessant für den Transport von Lebensmitteln.
-------------------------	--

Zeithorizont	mittelfristig
--------------	---------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: mittleres Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangabe:

Deckert, C. (2016): CSR und Logistik - Spannungsfelder Green Logistics und City-Logistik. Springer Verlag

7 | Lkw-Erweiterung Ladekapazität

Anhänger mit zwei Ebenen mit dem Ziel einer Reduktion des Leergewichts und Einführung von Lkw-Aufliegern mit größeren Maßen (insb. Höhe). Hierdurch können Anhänger mit zwei Ebenen eingeführt werden und diese somit eine höhere Transporteffizienz bewirken. In Kombination mit möglichem Leichtbau der Anhänger kann der THG-Ausstoß weiter gesenkt werden.

Auswirkung auf Fahrzeugauslastung, Verminderung von Fahrten, Transportbündelung, Fahrzeuggeometrie und Leichtbau

Umweltwirkung	Minderung von CO ₂ -Emissionen durch gesteigerte Transporteffizienz; Einsparung Kraftstoff ca. 0,5% pro 0,45t
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister, Verlader mit eigener Lkw-Flotte
-------------------------	--

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: mittleres Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangabe:

McKinnon, A., Cullinane, S., Browne, M., Whiteing, A. (2010): Green Logistics. Improving the environmental sustainability of logistics. 1. Auflage. Kogan Page Publishers. London, Philadelphia, New Delhi.

8 | Vans, Leichtbau und Vergrößerung der Ladefläche

Steigerung der Transportkapazität und -effizienz. Durch größere Ladeflächen und Einsatz von Leichtbau bei Vans wird die Effizienz von Transporten gesteigert. Gerade in urbanen Räumen mit geringeren Transportvolumen pro Fahrt können hier Minderungen im THG-Ausstoß realisiert werden.

Auswirkung auf Fahrzeuggeometrie, Leichtbau und Fahrzeugeffizienz

Umweltwirkung	Minderung von CO ₂ -Emissionen durch gesteigerte Transporteffizienz
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister
-------------------------	-----------------------

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: mittleres Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr
---	--------------------------------------

Literaturangabe:

McKinnon, A., Cullinane, S., Browne, M., Whiteing, A. (2010): Green Logistics. Improving the environmental sustainability of logistics. 1. Auflage. Kogan Page Publishers. London, Philadelphia, New Delhi.

Ebene 2: Zug-Ladefläche

9 | Langzug 740mPlus

Um mehr Ladung pro Fahrt zu transportieren und eine höhere Transporteffizienz zu erreichen, kann die Waggonzahl pro Zug gesteigert werden. Hierbei müssen jedoch gesteigerte Anforderungen an die Infrastruktur und auch die Triebwagen der Züge berücksichtigt werden.

9 | Langzug 740mPlus

Auswirkung auf Fahrzeuggeometrie und Fahrzeugeffizienz

Umweltwirkung	Höhere Ladekapazitäten und somit höhere Transportauslastung. Emissionsfaktoren pro Fahrzeugkilometer steigen durch die Steigerung der Auslastung von 25-30 auf 35 Waggons. Fahrtleistung von Zügen steigt um 14-29%, bzw. können 7-15 Lkw-Fahrten zusätzlich vermieden werden.
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister, DB Netze, Betreiber von Umschlagsbahnhöfen
-------------------------	---

Zeithorizont	kurzfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Schiene	Zuordnung Netzwerk (AP3): (Regional-) und Fernverkehr
--	---

Literaturangabe:

Allianz pro Schiene (2016): Überblick - Wie der Güterzug länger werden kann
 BMVI (2016): Bundesverkehrswegeplan 2030

Ebene 2: Schiff-Effizienz

10 | Schiff (Skysail)

Patentierter Lösung der Skysails Group GmbH. Es handelt sich um einen vollautomatischen Zugdrachenantrieb, der mit Hilfe von Windenergie Frachtschiffe und große Yachten zusätzlich zum Motorantrieb zieht. Dieser kann bei fast allen Schiffstypen ohne großen Aufwand nachgerüstet werden.

Auswirkung auf Wasserfahrzeugeffizienz und alternative Kraftstoffe

Umweltwirkung	Halbierung des Energieverbrauchs unter Idealbedingungen, durchschnittliche Einsparung zwischen 10 und 15 % pro Fahrzeugkilometer.
---------------	---

Adressierte Stakeholder	Reedereien
-------------------------	------------

Zeithorizont	kurzfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Wasserwege	Zuordnung Netzwerk (AP3): Fernverkehr
---	---------------------------------------

Literaturangabe:

SkySails (2017): SkySails Propulsion System - Turn wind into profit. Hamburg

11 | Optimierte Hydrodynamik bei Schiffen

Optimierte Hydrodynamik von Schiffen, die für geringere Geschwindigkeiten gebaut werden. Die optimierte Hydrodynamik verringert den Widerstand im Wasser und somit die benötigte Motorleistung, was zu sinkendem Kraftstoffverbrauch führt.

Auswirkung auf Schiffsgeometrie

11 | Optimierte Hydrodynamik bei Schiffen

Umweltwirkung	Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der THG-Emissionen (-15-20%)	
Adressierte Stakeholder	Reedereien	
Zeithorizont	mittelfristig	
Wirkungsweise: direkt		Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Wasserwege		Zuordnung Netzwerk (AP3): Fernverkehr
Literaturangabe: Winnes, H., Styhre, L., Fridell, E. (2015): Reducing GHG emissions from ships in port areas. In: Research in Transportation Business & Management 17, S. 73-82		

Ebene 2: Slow Steaming

12 | Slow Steaming-Wirkung auf gesamte Flotte

Bei einer Verringerung der in der Schifffahrt gefahrenen Geschwindigkeiten (bspw. um 10%, 20% oder 30%) verbrauchen die Motoren weniger Kraftstoff und die THG-Emissionen werden reduziert. Als positiver Nebeneffekt von Slow Steaming tritt eine verbesserte Planungssicherheit und eine höhere Pünktlichkeit auf.

Auswirkung auf Stauvermeidung durch zeitliche Entzerrung, Verlangsamung und Fahrzeugeffizienz

Umweltwirkung	Wird die Geschwindigkeit der Schiffe nur so weit reduziert, dass vorhandene stillgelegte Schiffe durch Reaktivierung die eingebüßten Transportleistung noch ausbalancieren können, ergibt sich ein Minderungspotential von 4%. Eine weitere Geschwindigkeitsreduzierung um 20-30% würde die Emissionen der Schifffahrt auf einen rückläufigen Pfad bringen und damit zur Erreichung der Ziele des Pariser Abkommens beitragen. Je nach Reduktion der Geschwindigkeit ist eine CO ₂ -Einsparung von 20-33% möglich.	
Adressierte Stakeholder	Reedereien, Häfen und Staaten	
Zeithorizont	Kurzfristig	
Wirkungsweise: direkt		Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Wasserwege		Zuordnung Netzwerk (AP3): Fernverkehr
Literaturangabe: Faber, J., Huigen, T., Nelissen, D. (2017): Regulating Speed: a short-term measure to reduce maritime GHG emissions. CS Delft, Delft, S. 9		

13 | Slow Steaming-Wirkung auf einzelne Schiffe und Kosten

Slow Steaming wirkt sich durch Geschwindigkeitsreduzierung bei einzelnen Schiffen positiv auf die CO₂-Emissionen aus. Die zeitabhängigen Betriebskosten der Schiffe steigen zwar, jedoch werden diese steigenden Kosten durch die fallenden Treibstoffkosten mehr als ausgeglichen.

Auswirkung auf Stauvermeidung durch zeitliche Entzerrung, Verlangsamung und Wasserfahrzeugeffizienz

13 | Slow Steaming-Wirkung auf einzelne Schiffe und Kosten

Umweltwirkung	Der Betrieb eines Schiffes mit niedrigeren Geschwindigkeiten führt zu Treibstoffeinsparungen aufgrund des reduzierten Wasserwiderstands. Daraus ergeben sich potenzielle Einsparungen im CO ₂ -Ausstoß um 13-32 % bei Containerschiffen, 15-38 % bei Massengutschiffen und 10-24 % bei Tankern.	
Adressierte Stakeholder	Reedereien, Häfen und Staaten	
Zeithorizont	Kurzfristig	
Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum	
Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Wasserwege	Zuordnung Netzwerk (AP3): Fernverkehr	
Literaturangabe: Faber, J., Huigen, T., Nelissen, D. (2017): Regulating Speed: a short-term measure to reduce maritime GHG emissions. CS Delft, Delft, S. 9 Healy, S., Graichen, J. (2019): Impact of slow steaming for different types of ships carrying bulk cargo. Öko-Institut e.V., Freiburg		

Ebene 2: Flugzeug-Effizienz

14 | Flugzeug, optimierte Triebwerke

Erneuerung und Anpassung der Triebwerke an die neuesten Standards und Vorgaben. Ziel ist es, die Triebwerke effizienter zu machen und so den Kraftstoffverbrauch zu senken.

Auswirkung auf Fahrzeugeffizienz		
Umweltwirkung	Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der THG-Emissionen	
Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister	
Zeithorizont	Langfristig	
Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum	
Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Luft	Zuordnung Netzwerk (AP3): Fernverkehr	
Literaturangabe: BDLI (2020): Nachhaltige und klimaneutrale Luftfahrt aus Deutschland für die Energiewende am Himmel – Technologiestrategie der deutschen Luftfahrtindustrie. Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e.V., Berlin		

15 | Optimierte Bauteile des Flugzeugs

Erneuerung und Anpassung der Bauteile im Flugzeug, um Kraftstoffverbrauch zu senken. Hierbei kann es sich sowohl um eine Anpassung der Aerodynamik handeln, aber auch um die Modernisierung von Bauteilen im Inneren (v.a. mit Blick auf Energieeffizienz und Leichtbau), um einen geringeren Energieverbrauch zu realisieren.

15 | Optimierte Bauteile des Flugzeugs

Auswirkung auf Fahrzeugeffizienz

Umweltwirkung	Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der THG-Emissionen
---------------	---

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister
-------------------------	-----------------------

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Luft	Zuordnung Netzwerk (AP3): Fernverkehr
---	---------------------------------------

Literaturangabe:

BDLI (2020): Nachhaltige und klimaneutrale Luftfahrt aus Deutschland für die Energiewende am Himmel – Technologiestrategie der deutschen Luftfahrtindustrie. Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e.V., Berlin

6.2 Alternative Antriebe

Ebene 2: Lkw-Antrieb

16 | Verbot von Fahrzeugen mit hohen Emissionswerten und Ersetzen durch klimaschonende Alternativen

Das Verbot und die damit einhergehende Emissionsreduzierung kann auf verschiedensten Ebenen ansetzen. Regulierungsansatz, bei dem Fahrzeuge verboten werden, die bei gewissen Kennzahlen zu hohe Werte aufweisen und somit schädlich für die Umwelt sind. Diese Fahrzeuge können dann durch effizientere Alternativen ersetzt werden und somit zu einer positiveren Umweltbilanz beitragen.

Auswirkung auf Fahrzeugeffizienz

Umweltwirkung	Reduktion der Emissionen um 80 % im Hafen von Los Angeles durch das Verbot von LKW mit hohem Emissionsniveau (Fallstudie von 2012). Studien aus Rom haben bei der Einführung einer lokalen Low Emission Zone folgende Emissionsminderungen modelliert: CO - 47%, NO _x -13%, PM ₂₅ -23%, PM ₁₀ -20%, CO ₂ -2%.
---------------	---

Adressierte Stakeholder	Unternehmen, Logistikdienstleister und Politik
-------------------------	--

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung: Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
--	--

Literaturangabe:

Faccio, M., Gamberi, M. (2015): New City Logistics Paradigm: From the “Last Mile” to the “Last 50 Miles” Sustainable Distribution. In: Sustainability 15, S. 14873-14894

MDS Transmodal Limited (2012): DG Move European Commission: Urban Freight Transport. Final report

17 | Lkw Flottenerneuerung (Hybrid)

Einsatz von Lkw mit Hybridmotoren, um herkömmliche Dieselfahrzeuge zu ersetzen und die negativen Umweltauswirkungen zu reduzieren.

Auswirkung auf Fahrzeugeffizienz und alternative Antriebe

Umweltwirkung	Kraftstoff- und somit auch CO ₂ -Einsparungen um ca. 20 %
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Fuhrunternehmer, Verlader im Selbsteintritt
-------------------------	---

Zeithorizont	kurzfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung: Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
--	--

Literaturangabe:

ALICE (2019): A framework and process for the development of a roadmap towards zero emissions logistics 2050

18 | Lkw Flottenerneuerung (Elektro)

Einsatz von Lkw mit Elektromotoren, um herkömmliche Dieselfahrzeuge zu ersetzen und die negativen Umweltauswirkungen zu reduzieren.

Auswirkung auf Fahrzeugeffizienz und alternative Antriebe

Umweltwirkung	BEV-LKW weisen mit Strommix 2030 je nach Größenklasse und Einsatzprofil um etwa 30-45 % geringere THG-Emissionen pro km auf.
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Fuhrunternehmer, Verlader im Selbsteintritt
-------------------------	---

Zeithorizont	mittelfristig
--------------	---------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung: Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
--	--

Literaturangabe:

ALICE (2019): A framework and process for the development of a roadmap towards zero emissions logistics 2050

Iwan, S. et al. (2019): Electric mobility in European urban freight and logistics – status and attempts of improvement. In: Transportation Research Procedia 39, S. 112-123

Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Räder, D.; Köllermeier, N.; Waßmuth, V. (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030: Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“. Gefördert durch Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, PTV Group, Heidelberg, Karlsruhe.

19 | Lkw Flottenerneuerung (OH)

Einsatz von Oberleitungs-Lkw oder Oberleitungs-Hybrid-Lkw, die ganz oder teilweise mit Fahrstrom aus einer Oberleitung elektrisch betrieben werden können, bieten ein großes Potential, um herkömmliche Dieselfahrzeuge zu ersetzen und die negativen Umweltauswirkungen zu reduzieren.

Auswirkung auf Fahrzeugeffizienz und alternative Antriebe

Umweltwirkung	Oberleitungs-Lkw weisen ca. 40 % geringere THG-Emissionen pro km auf.
---------------	---

Adressierte Stakeholder	Fuhrunternehmer, Verlader im Selbsteintritt
-------------------------	---

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung: Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
--	--

Literaturangabe:

ALICE (2019): A framework and process for the development of a roadmap towards zero emissions logistics 2050

Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Räder, D.; Köllermeier, N.; Waßmuth, V. (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030: Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“. Gefördert durch Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, PTV Group, Heidelberg, Karlsruhe.

20 | Brennstoffzellen Lkw

Einsatz von Lkw mit Antrieben, die auf Brennstoffzellentechnik basieren, um herkömmliche Dieselfahrzeuge zu ersetzen und die negativen Umweltauswirkungen zu reduzieren.

Auswirkung auf Fahrzeugeffizienz und alternative Antriebe

Umweltwirkung	Minderung der lokalen CO ₂ -Emissionen, im gesamten Zyklus sind die Minderungspotentiale abhängig von der Erzeugungsart des Wasserstoffs.
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Fuhrunternehmer, Verlader im Selbsteintritt
-------------------------	---

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	generisches Anwendungsspektrum
-----------------------	--------------------------------

Zuordnung: Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
--	--

Literaturangabe:

ALICE (2019): A framework and process for the development of a roadmap towards zero emissions logistics 2050

Ebene 2: Schiff-Antrieb

21 | LNG Schiff

Umrüstung von Schiffen auf LNG-Antrieb, um Schwerölverbrauch und entsprechende Emissionen zu reduzieren.

Auswirkung auf alternative Kraftstoffe

Umweltwirkung	Reduktion der THG-Emissionen um 15-20% und Reduktion von Schadstoffen (bspw. auch Schwefel- und BC/Black Carbon-Emissionen)
---------------	---

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister, Reedereien
-------------------------	-----------------------------------

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Wasserwege	Zuordnung Netzwerk (AP3): Fernverkehr
---	---------------------------------------

Literaturangabe:

Wang, S., Notteboom, T. (2014): The Adoption of Liquefied Natural Gas as a Ship Fuel: A Systematic Review of Perspectives and Challenges. In: Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal 34 (6), S. 749-774

Lindstad. E. (2019): Increased use of LNG might not reduce maritime GHG emissions at all

Winnes, H., Styhre, L., Fridell, E. (2015): Reducing GHG emissions from ships in port areas. In: Research in Transportation Business & Management 17, S. 73-82

22 | Brennstoffzelle Schiff

Umrüstung von Schiffen auf Brennstoffzellentechnik, um Schwerölverbrauch und entsprechende Emissionen zu reduzieren. Zusätzlich trägt der gesteigerte Wirkungsgrad der Technik zu einer höheren Energieeffizienz bei. In einem Pilotprojekt bei Essen wird z. B. ein Methanol-Brennstoffzellensystem verwendet. Im Zeithorizont 2030 ist hier aber noch nicht mit einer nennenswerten Durchdringung zu rechnen.

Auswirkung auf alternative Kraftstoffe

Umweltwirkung	Reduktion der Emissionen durch alternative Antriebsformen
---------------	---

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister
-------------------------	-----------------------

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Wasserwege	Zuordnung Netzwerk (AP3): Fernverkehr
---	---------------------------------------

Mitzel, J., Friedrich, A. (2018): Wasserstoff und Brennstoffzellen. In: BWK 70 (5), S. 128-138.

Ebene 2: Flugzeug-Antrieb

23 | Power-to-Liquid Flugzeug

Einsatz von synthetischen Power-to-Liquid-Kraftstoffen in der Luftfahrt. Durch deutlich höhere Reichweiten als elektrische Antriebssysteme und der bereits vorhandenen Infrastruktur können die E-Kraftstoffe in der Luftfahrt zu sinkenden THG-Emissionen beitragen.

Auswirkung auf alternative Kraftstoffe

Umweltwirkung	Die Treibhausgasvermeidung gegenüber fossilen Kerosintypen liegt für Kerosin auf Basis von Biomasse bei 18 % bis 41 %, und auf Basis von erneuerbarem Strom bei ca. 54 %.
---------------	---

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister
-------------------------	-----------------------

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Luft	Zuordnung Netzwerk (AP3): Fernverkehr
---	---------------------------------------

Literaturangabe:
BMVI (2014): Drop-In-Kraftstoffe für die Luftfahrt. Berlin

Ebene 2: Zug-Antrieb

24 | Alternative Antriebe für Züge (Batterieelektrisch oder Brennstoffzelle)

Herkömmliche Dieselantriebe in Zügen werden durch alternative Antriebsformen (bspw. Wasserstoff, Elektro, o.ä.) ersetzt und somit der THG-Ausstoß verringert. Für eine Umsetzung ist auch die Anpassung der Infrastruktur an die Antriebsart notwendig, um einen reibungslosen und wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen.

Auswirkung auf Fahrzeugeffizienz und alternative Kraftstoffe

Umweltwirkung	Reduktion von CO ₂ -Emissionen durch Einsatz alternativer Antriebsformen
---------------	---

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister
-------------------------	-----------------------

Zeithorizont	mittelfristig
--------------	---------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Schiene	Zuordnung Netzwerk (AP3): Regional- und Fernverkehr
--	---

Literaturangabe:
Mitzel, J., Friedrich, A. (2018): Wasserstoff und Brennstoffzellen. In: BWK 70 (5), S. 128-138

25 | Schiene (Ausbau Elektro)

Das Vorantreiben der Elektrifizierung im Bahnverkehr ersetzt mehr und mehr herkömmliche und dieselgetriebene Triebwagen durch Wagen mit Elektroantrieb. Dies trägt zu einer Reduktion der THG-Emissionen und zu geringeren Umweltauswirkungen bei.

Auswirkung auf Fahrzeugeffizienz

25 | Schiene (Ausbau Elektro)

Umweltwirkung	Reduktion von CO ₂ -Emissionen durch alternative Antriebsart	
Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister, Staat	
Zeithorizont	langfristig	
Wirkungsweise: direkt		Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Schiene		Zuordnung Netzwerk (AP3): Regional- und Fernverkehr
Literaturangabe: Heinold, A., Meisel, F. (2018): Emission rates of intermodal rail/road and road-only transportation in Europe: A comprehensive simulation study. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment 65, S. 421-437		

6.3 Letzte Meile

Ebene 2: B2C/B2B

26 | Direkte Auslieferung an den Kunden

Das bestehende Lieferantennetzwerk über verschiedene Zwischenstationen wird durch Direktlieferungen zum Kunden ersetzt. Dabei wird die Anzahl von Fahrten zu Zwischenhändlern und Logistikdienstleistern deutlich reduziert.

Auswirkung auf Routenoptimierung

Umweltwirkung	Wegfall von Fahrten zu Zwischenhändlern oder Logistikdienstleistern und damit ggf. Reduktion von Transportkilometern (tatsächliche Einsparung abhängig von der Auslastung)	
Adressierte Stakeholder	Unternehmen	
Zeithorizont	mittelfristig	
Wirkungsweise: direkt		Breite der Maßnahme: mittleres Anwendungsspektrum
Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße		Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr / Schnittstelle zum Regionalverkehr
Literaturangabe: VAUDE (2021): Nachhaltigkeitsbericht 2020 – VAUDE, Tettngang URL: https://nachhaltigkeitsbericht.vaude.com/gri/umwelt/warenlogistik.php (zuletzt aufgerufen am 10.08.2021)		

27 | Lieferfahrzeug LNG/Elektro für Lebensmittel

Lieferfahrzeuge werden mit LNG oder Elektroantrieben ausgerüstet und fahren die Waren zu den Kunden aus. Somit fallen die Einzelfahrten der Kunden mit ihren Privat-Pkw (in den meisten Fällen mit Verbrennungsmotoren) weg und werden durch emissionsärmere Alternativen ersetzt.

Auswirkung auf Modal Split, Verminderung von Fahrten und Transportbündelung

27 | Lieferfahrzeug LNG/Elektro für Lebensmittel

Umweltwirkung	Sowohl die Lieferung mit Elektrofahrzeugen als auch mit Verbrennungsmotoren reduziert die CO ₂ -Emissionen im Vergleich zu Einzelfahrten, sodass bis zu 40% eingespart werden könnten.	
Adressierte Stakeholder	Endkunden, Lebensmitteleinzelhandel	
Zeithorizont	kurzfristig	
Wirkungsweise: direkt		Breite der Maßnahme: spezifisches Anwendungsspektrum
Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße		Zuordnung Netzwerk (AP3): Nah- und Regionalverkehr

Literaturangabe:

Saenz-Esteruelas, J. et al. (2016): Electrifying Last-Mile Deliveries: A Carbon Footprint Comparison between Internal Combustion Engine and Electric Vehicles. In: Lecture Notes in Computer Science 9704, S. 76-84

Ninnemann, J. et al. (2017): Last-Mile-Logistics Hamburg –Innerstädtische Zustelllogistik. HSBA - Hamburg School of Business Administration, Hamburg

Andaloro, L. et al. (2015): Development of a new concept electric vehicle for last mile transportations. In: World Electric Vehicle Journal 7, S. 1-7

Sachs, C. et al. (2016): Assessing the Market of Light Electric Vehicles as a Potential Application for Electric In-wheel Drives

Awwad, M., Shekar, A., Iyer, A. (2018): Sustainable Last-Mile Logistics Operation in the Era of E-Commerce. In: Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Washington D.C.

Ebene 2: Nachtlogistik

28 | E-Lkw für Nachtlogistik

Die Lkw für die Anlieferung im Lebensmitteleinzelhandel werden durch geräuscharme E-Lkw ersetzt. Durch die geringeren Lärmemissionen (ergänzt durch weitere Maßnahmen wie geräuscharme Hubwagen o.ä.) kann das Zeitfenster der Lieferung in die Tagesrandzeiten oder die Nacht verschoben werden. Die Anlieferung wird so zeitlich entzerrt und kann außerhalb von Stoßzeiten durchgeführt werden, was neben dem Umstieg auf elektrische Antriebe zusätzliche Einsparungen bei THG-Emissionen mit sich bringt.

Auswirkung auf Routenoptimierung, Stauvermeidung durch zeitliche Entzerrung und Fahrzeugeffizienz

Umweltwirkung	Emissionsminderung durch alternative Antriebe und zeitliche Verlagerung der Lieferungen beträgt je nach Strommix 8 bis 25%	
Adressierte Stakeholder	Einzelhandel	
Zeithorizont	mittelfristig	
Wirkungsweise: direkt		Breite der Maßnahme: mittleres Anwendungsspektrum
Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße		Zuordnung Netzwerk (AP3): Nah- und Regionalverkehr

28 | E-Lkw für Nachtlogistik

Literaturangabe:

Stockmann, M. et al. (2017): Potenziale einer geräuscharmen Nachtlogistik - Ergebnisse und Handlungsempfehlungen des Forschungsprojekts GeNaLog. Fraunhofer IML, Dortmund

29 | Lieferung außerhalb von Stoßzeiten

Reduzierung von Staus und Fahrzeit durch die Verlegung der Lieferzeit auf weniger frequentierte Uhrzeiten (z. B. nachts). Die Lieferkette kann also so gestaltet werden, dass THG-Emissionen durch weniger Standzeit in Staus und einen besseren Verkehrsfluss reduziert werden. Reduzierung von Staus und Fahrzeit durch die Verlegung der Lieferzeit auf weniger frequentierte Uhrzeiten (z. B. nachts). Die Lieferkette kann also so gestaltet werden, dass THG-Emissionen durch weniger Standzeit in Staus und einen besseren Verkehrsfluss reduziert werden.

Auswirkung auf Stauvermeidung durch zeitliche Entzerrung

Umweltwirkung	Barcelona: Belieferung von Supermärkten in der Nacht führte zu 50 % Zeitreduzierung, 57 % Kraftstoffreduzierung und 53 % Emissionsreduzierung. Weitere Studien berichten von einer CO ₂ -Reduktion pro Kilometer zwischen 11-67%.
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister, und Unternehmen
-------------------------	--

Zeithorizont	mittelfristig
--------------	---------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangabe:

Stockmann, M. et al. (2017): Potenziale einer geräuscharmen Nachtlogistik - Ergebnisse und Handlungsempfehlungen des Forschungsprojekts GeNaLog. Fraunhofer IML, Dortmund

Letnik, T. et al. (2018): Review of policies and measures for sustainable and energy efficient urban transport. In: Energy 163, S. 245-257

Holguin-Veras, J. et al. (2016): Direct Impacts of off-hour deliveries on urban freight emissions. In: Transportation Research Part D - Transport and Environment.

Ebene 2: Standortwahl

30 | Transport via E-Bike

Einsatz von E-Bikes bei Lieferungen auf der letzten Meile. Die Auslieferung via Zustellfahrzeugen wird durch das Einführen von Mikro-Hubs und E-Bikes als Transportmittel ersetzt. Die THG-Emissionen können so maßgeblich verringert und die negativen Auswirkungen des Lieferverkehrs auf der letzten Meile deutlich reduziert werden.

Auswirkung auf Modal Split und Routenoptimierung

Umweltwirkung	Einsparungen von CO ₂ -Emissionen bis zu 75% durch Verlagerung auf alternative Antriebsarten. Rund 42% der durch Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor durchgeführten Zustellaufträge, und 19% der daraus resultierenden Fahrleistung können mit E-Bikes substituiert werden.
---------------	--

30 | Transport via E-Bike

Adressierte Stakeholder	KEP-Branche	
Zeithorizont	langfristig	
Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: mittleres Anwendungsspektrum	
Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr	
Literaturangabe: Nocerino, R. (2016): E-bikes and E-scooters for smart logistics: environmental and economic sustainability in pro-E-bike Italian pilots. In: Transportation Research Procedia 14, S. 2362-2371		
Ninnemann, J. et al. (2017): Last-Mile-Logistics Hamburg –Innerstädtische Zustelllogistik. HSBA - Hamburg School of Business Administration, Hamburg		

31 | Lastenräder

Nutzung von Lastenrädern zur Verteilung in der Stadt. Die Radinfrastruktur dafür sollte vorhanden sein. Es kommt zur Emissions- und Lärmreduzierung sowie niedrigeren Kosten und erleichterten Zugang zum Ziel.

Auswirkung auf Modal Split und Routenoptimierung

Umweltwirkung	Emissionsreduktion von 250g CO ₂ pro km in Turin, 102g CO _{2eq} pro Paket für Deutschland. Je nach Studie können 14-50% Transportkilometer eingespart werden.	
Adressierte Stakeholder	Kommunen, KEP-Branche	
Zeithorizont	kurzfristig	
Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: mittleres Anwendungsspektrum	
Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr	
Literaturangabe: Ninnemann, J. et al. (2017): Last-Mile-Logistics Hamburg –Innerstädtische Zustelllogistik. HSBA - Hamburg School of Business Administration, Hamburg		
Conway, A. (2011): Urban micro-consolidation and las mile goods delivery by freigth-tricycle in Manhattan: Opportunities and challenges		
Schliwa, G. et al. (2015): Sustainable city logistics — Making cargo cycles viable for urban freight transport. In: Research in Transportation Business & Management 15, S. 50-57		
Allekotte, M. (2021): Lastenradeinsatz im KEP-Bereich Fallbeispiel aus dem UBA-Projekt „Ökologische Bewertung von Verkehrsarten“ – Beitrag zum Workshop: Klimaschutz auf der letzte Meile - Aspekte, Möglichkeiten und Bedeutung der Konferenz “Klimafreundlicher Lieferverkehr für saubere und lebenswerte Städte 2021		

Ebene 2: Urbane Logistik

32 | Nutzung von Schiffen in der städtischen Logistik

Die Nutzung von Wasserwegen in der Stadt reduziert Verkehr und Emissionen. Die Anwendung ist besonders vorteilhaft in den Bereichen Nahrung, Baumaterialien und Müll, ist jedoch auf die Verfügbarkeit von geeigneten Wasserwegen angewiesen.

Auswirkung auf Modal Split und Routenoptimierung

Umweltwirkung	In Paris konnten in einem Pilotprojekt durch teilweise Verlagerung des Transports vom Regionallager zu den Geschäften über den Fluss Seine 37 % an Energie (CO ₂ -Emissionen) und 450.000 Fahrzeugkilometer eingespart werden. Eine Studie aus Amsterdam berichtet von einer Streckeneinsparung von 150.000km pro Jahr auf der Straße durch den Einsatz eines schwimmenden Distributionszentrums.
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Kommunen und Häfen, Logistikdienstleister
-------------------------	---

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Wasserwege	Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr / Schnittstelle zum Regionalverkehr
---	--

Literaturangabe:
 Letnik, T. et al. (2018): Review of policies and measures for sustainable and energy efficient urban transport. In: Energy 163, S. 245-257

Erdinch, H.; Huang, C. (2014): City Logistics Optimization: Gotheburg Inner City Freight Delivery. Master Degree Project. University of Gothenburg, School of Business, Economics and Law

33 | Intelligente Servicestationen

Intelligente Servicestationen als Hubs für Last-Mile-Delivery. Diese dienen als gemeinsame Anlaufstation für verschiedene Zusteller, die bevorzugt mit emissionsarmen Fahrzeugen wie etwa Lastenfahrrädern oder E-Vans ausliefern. Die Zustellraten und das Zeitmanagement verbessern sich deutlich und schlagen sich in geringeren THG-Emissionen nieder, ebenso wie bessere Auslastungen und geringere Strecken.

Auswirkung auf Routenoptimierung, Netzwerkoptimierung, Verminderung von Fahrten und Transportbündelung

Umweltwirkung	Durch Einsatz der Servicestationen und der Zusammenlegung von Lieferungen können 24% THG-Emissionen gespart werden. Beispiele aus London zeigen, dass intelligente Servicestationen in Verbindung mit Cargo Tricycles zu einer CO ₂ -Reduktion von 20% pro Paket führen, bzw. sogar 40%, wenn E-Vans auf der letzten Meile eingesetzt werden. Die Anzahl von Fahrzeugen, die in die Stadt fahren, können reduziert werden und Auslastungen verbessert werden. Ebenso werden Gesamtstrecken einzelner Fahrzeuge verringert.
---------------	--

Adressierte Stakeholder	KEP-Branche
-------------------------	-------------

Zeithorizont	mittelfristig
--------------	---------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: mittleres Anwendungsspektrum
-------------------------	---

33 | Intelligente Servicestationen

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße

Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr /
Schnittstelle zum Regionalverkehr

Literaturangabe:

Conway, A. (2011): Urban micro-consolidation and last mile goods delivery by freight-tricycle in Manhattan: Opportunities and challenges

Faccio, M., Gamberi, M. (2015): New City Logistics Paradigm: From the “Last Mile” to the “Last 50 Miles” Sustainable Distribution. In: Sustainability 15, S. 14873-14894

Awwad, M., Shekar, A., Iyer, A. (2018): Sustainable Last-Mile Logistics Operation in the Era of E-Commerce. In: Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Washington D.C.

6.4 Verlagerung Bahn

Ebene 2: Kombination ÖPNV und Logistik

34 | Nutzung von ÖPNV-Strecken

Nutzung des vorhandenen Untergrund-Schienennetzes während Nachtzeiten bzw. Ausbau der Kombination mit dem ÖPNV erhöht die Auslastung des vorhandenen Netzes rund um die Uhr und steigert somit die Effizienz des Transportsystems

Auswirkung auf Modal Split, Fahrzeugauslastung, Transportbündelung und Kombiniertes Verkehr

Umweltwirkung

Höhere Auslastungen und somit Einsparungen bei CO₂-Emissionen

Adressierte
Stakeholder

Kommunen, ÖPNV-Anbieter, Logistikdienstleister

Zeithorizont

langfristig

Wirkungsweise: indirekt

Breite der Maßnahme: mittleres
Anwendungsspektrum

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport,
Verkehrsträger übergreifend

Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr /
Schnittstelle zum Regionalverkehr

Literaturangabe:

Sylvester, A. (2020): Synergien zwischen ÖPNV und Logistik im ländlichen Raum. LaLoG LandLogistik GmbH, Frankfurt/Oder

Ebene 2: Verlagerung Straße-Schiene

35 | Verlagerung von Straße auf Schiene

Verlagerung der Transportstrecke von der Straße auf die im Vergleich emissionsärmere Schiene reduziert die Fahrten von Lkws und führt zu einer positiveren Umweltbilanz.

Auswirkung auf Kombiniertes Verkehr

Umweltwirkung

Deutliche Verringerung der CO₂-Emissionen. Bei Schwergütern konnten in Testversuchen 33g CO₂e pro Tonnenkilometer eingespart werden, bei Volumengütern 58g CO₂e pro Tonnenkilometer.

35 | Verlagerung von Straße auf Schiene

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister, Verloader	
Zeithorizont	langfristig	
Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum	
Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Verkehrsträgerübergreifend	Zuordnung Netzwerk (AP3): Regional- und Fernverkehr	
Literaturangabe: Heinold, A., Meisel, F. (2018): Emission rates of intermodal rail/road and road-only transportation in Europe: A comprehensive simulation study. In: Transportation Research Part D 65, S. 421-43		
Pinchasik, D. et al. (2020): Crossing Borders and Expanding Modal Shift Measures: Effects on Mode Choice and Emissions from Freight Transport in the Nordics. In: Sustainability 12 (3), S. 894		

Ebene 2: Verlagerung Straße-Schiene-Schiff

36 | Optimierung Kombiniertes Verkehr: Straße-Schiene-Schiff

Die optimale Verteilung auf die verschiedenen Verkehrsträger erfolgt nach den jeweiligen Vor- und Nachteilen des entsprechenden Verkehrsträgers. Dieser kann nach entsprechenden Nachhaltigkeitsaspekten gewählt werden und so die Effizienz des Transports optimiert werden.

Auswirkung auf Kombiniertes Verkehr

Umweltwirkung	Deutliche Verringerung der CO ₂ -Emissionen	
Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister, Verloader	
Zeithorizont	langfristig	
Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum	
Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Verkehrsträgerübergreifend	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar	
Literaturangabe: Norlund, E., Gribkovskaia, I. (2015): Modal split in offshore supply network under the objective of emissions minimization. In: Transportation Research Part D, S. 160-174		
Abschlussbericht zum Projekt „Handlungsoptionen für eine ökologische Gestaltung der Transportmittelwahl im Güterfernverkehr“ von 2022, verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/handlungsoptionen-fuer-eine-oekologische-gestaltung		

6.5 Optimierung Umschlag

Ebene 2: Umschlag

37 | Optimierung Modal Split

Optimierung des Zusammenspiels der verschiedenen Verkehrsträger und der Verbindungen zwischen ihnen durch das Hinzufügen und Optimieren von Umschlagmöglichkeiten. Ein Beispiel ist die Optimierung der Schiff-Hafen-Schnittstellen, um die Wartezeit für Schiffe zu verkürzen. Dazu gehört die Minimierung der Wartezeiten für Lkw (oder andere Verkehrsmittel) an den Terminals. Ein weiteres Beispiel ist der Einsatz von Straßengüterverkehrsfahrzeugen mit hoher Kapazität im ersten und letzten Straßenabschnitt des kombinierten und multimodalen Verkehrs, wodurch die Zahl der eingesetzten Fahrzeuge um ein Drittel reduziert werden könnte.

Auswirkung auf Modal Split, Routenoptimierung und Stauvermeidung durch zeitliche Verlagerung

Umweltwirkung	THG-Reduktion durch effiziente Prozesse und optimalen Einsatz von Ressourcen
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Reedereien, Logistikdienstleister, Hafengebeteiber
-------------------------	--

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Verkehrsträgerübergreifend	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangabe:

Bouchery, Y., Fransoo, J. (2015): Cost, carbon emissions and modal shift in intermodal network design decisions. In: International Journal of Productions Economics, S. 388-399

Mostert, M., Caris, A., Limbourg, S. (2017): Road and intermodal transport performance: the impact of operational costs and air pollution external costs. In: Research in Transportation Business & Management 23, S. 75-85

Heinold, A., Meisel, F. (2018): Emission rates of intermodal rail/road and road-only transportation in Europe: A comprehensive simulation study. In: Transportation Research Part D 65, S. 421-437

Ebene 2: Green Ports

38 | Häfen – Implementierung von Landstrom

Betrieb der Nebenverbraucher an Bord während der Anlegezeit mit Landstrom. Dabei muss der Anschluss im Hafen installiert und die Schiffe mit entsprechender Technik ausgerüstet sein. Entscheidend ist der Einsatz von Strom aus einem entsprechenden Energiemix mit hohen Anteilen aus erneuerbaren Energien.

Auswirkung auf Erneuerbare Energien

Umweltwirkung	Reduktion von THG (zwischen 5-10% der CO ₂ -Emissionen) und weiteren Emissionen bei der Verwendung von EE-Strom.
---------------	---

Adressierte Stakeholder	Reedereien, Häfen, Staat
-------------------------	--------------------------

Zeithorizont	mittelfristig
--------------	---------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-------------------------	---

38 | Häfen – Implementierung von Landstrom

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Wasserwege

Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar

Literaturangabe:

Winnes, H., Styhre, L., Fridell, E. (2015): Reducing GHG emissions from ships in port areas. In: Research in Transportation Business & Management 17, S. 73-82

39 | Häfen – Reduktionspotenzial für Häfen aus kombinierten Maßnahmen

Zu den schiffsseitigen Maßnahmen gehört die Verwendung von alternativen Kraftstoffen (LNG, LPG, Methanol-fossil, Methanol-EE, Ammoniak OPS), anderes Design (Erhöhung des Anteils von energieeffizienten Schiffen über EEDI, Besonderes effiziente kleine Schiffe), Maßnahmen im Betrieb (Reduced Speed bei Anfahrt, Reduzierte Liegezeiten, Eco-driving während Manövrieren, Schnellerer Anschluss an OPS).

Auswirkung auf Verlangsamung, Schiffsgeometrie, Antriebseffizienz

Umweltwirkung

ca. 13% Reduktionpotenzial bei kombinierten Maßnahmen. Dabei haben die Maßnahmen im Betrieb des Schiffes im Hafen den größten Effekt (10%)

Adressierte Stakeholder

Reedereien, Häfen,

Zeithorizont

mittelfristig

Wirkungsweise: direkt

Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Wasserwege

Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar

Literaturangabe:

Notteboom, T. et al. (2020): The Role of Seaports in Green Supply Chain Management: Initiatives, Attitudes, and Perspectives in Rotterdam, Antwerp, North Sea Port, and Zeebrugge. In: Sustainability 12 (4), 1688

Winnes, H., Styhre, L., Fridell, E. (2015): Reducing GHG emissions from ships in port areas. In: Research in Transportation Business & Management 17, S. 73-82

6.6 Effizienz Lager

Ebene 2: Energie Lager

40 | Effiziente Temperatursteuerung in Gebäuden

Anpassung und Optimierung von Temperatur und Luftzirkulationsmanagement entsprechend der Anforderungen. So können beispielsweise verschiedene Temperaturzonen geschaffen werden, um unnötige Kühlung zu vermeiden oder Türen und Tore nur bei Bedarf geöffnet werden, um die Kühlleistung und somit auch den Energiebedarf zu reduzieren.

Auswirkung auf Erneuerbare Energien und LED

Umweltwirkung

Reduktion der Temperatur um 1°C resultiert in etwa in 10% geringerem Energieverbrauch

Adressierte Stakeholder

Lagerlogistik

40 | Effiziente Temperatursteuerung in Gebäuden

Zeithorizont | mittelfristig

Wirkungsweise: direkt

Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum

Zuordnung Supply Chain (AP2): Lagerei, Gebäude

Zuordnung Netzwerk (AP3): -

Literaturangabe:

McKinnon, A., Cullinane, S., Browne, M., Whiteing, A. (2010): Green Logistics. Improving the environmental sustainability of logistics. 1. Auflage. Kogan Page Publishers. London, Philadelphia, New Delhi.

41 | Intelligente Beleuchtungssteuerung

Umstellung auf LED-Beleuchtung sowie intelligente und bedarfsgerechte Beleuchtungskonzepte, die eine entsprechende Ausleuchtung von Bereichen bei Bedarf generieren und bei Nichtbedarf den Energieverbrauch entsprechend reduzieren.

Auswirkung auf Effizienz Tageslichtnutzung und LED

Umweltwirkung

Deutlich geringerer Energieverbrauch und somit positive Auswirkungen auf die THG-Bilanz (verschiedene Praxisbeispiele berichten von 8-20% Einsparungen im Energieverbrauch)

Adressierte Stakeholder

Lagerlogistik

Zeithorizont

kurzfristig

Wirkungsweise: indirekt

Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum

Zuordnung Supply Chain (AP2): Lagerei, Gebäude

Zuordnung Netzwerk (AP3): -

Literaturangabe:

Lochmahr, A. (2016): Praxishandbuch Grüne Automobillogistik. Springer Fachmedien Wiesbaden.

42 | Nachhaltige Gebäudenutzung

Kombination aus verschiedenen Maßnahmen, die zu einer Nachhaltigen Gebäudenutzung beitragen. Beispielhaft handelt es sich hierbei um Automatisierte Lagerung, effiziente Fördertechniken, die Abschaffung überflüssiger Heiz- und Kühlsysteme und die Nutzung von Tageslicht.

Auswirkung auf Effiziente Tageslichtnutzung, Moderne Heiz- und Kühlsysteme und Bauweise des Gebäudes

Umweltwirkung

Miteinander vernetzte Kreisläufe reduzieren Verschwendung deutlich und führen "verbrauchte" Ressourcen wieder in das System zurück.

Adressierte Stakeholder

Lagerlogistik

Zeithorizont

langfristig

Wirkungsweise: indirekt

Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum

Zuordnung Supply Chain (AP2): Lagerei, Gebäude

Zuordnung Netzwerk (AP3): -

Literaturangabe:

42 | Nachhaltige Gebäudenutzung

Lochmahr, A. (2016): Praxishandbuch Grüne Automobillogistik. Springer Fachmedien Wiesbaden.

43 | Effiziente Inhouse Logistik

Senken des Energiebedarfs durch den Einsatz von Elektro-Staplern, leichten Paletten und das Einführen einer effizienten Lagerorganisation. Zusätzlich kann eine Stromgewinnung durch Photovoltaikanlagen zu einer nachhaltigen Inhouse-Logistik beitragen.

Auswirkung auf Ladungsträger, Fahrzeugeffizienz, Erneuerbare Energien, Effiziente Tageslichtnutzung, Wärmedämmung und LED

Umweltwirkung	Kleinere Einsparungen können im Gesamten zu großen Einsparungen an Energie und anderen Ressourcen führen. Dies macht sich besonders in einer verbesserten THG-Bilanz bemerkbar.
---------------	---

Adressierte Stakeholder	Logistik und Automotive
-------------------------	-------------------------

Zeithorizont	mittelfristig
--------------	---------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Lagerei, Inhouse-Logistik	Zuordnung Netzwerk (AP3): -
---	-----------------------------

Literaturangabe:
Lochmahr, A. (2016): Praxishandbuch Grüne Automobillogistik. Springer Fachmedien Wiesbaden.

44 | Gebäudestandards für Lagerlogistik

Einführung von Gebäudestandards in der Lagerlogistik, die besonders Nachhaltigkeitsaspekte wie Energieverbrauch und THG-Emissionen in der Bauweise und Ausstattung berücksichtigen. Somit werden besonders Neubauten energetisch effizienter und die Umweltwirkungen durch den Energieverbrauch reduziert.

Höhere Nachfrage nach erneuerbare Energien, Effiziente Tageslichtnutzung, Wärmedämmung, Moderne Heiz- und Kühlsysteme, Bauweise des Gebäudes, Flächenverbrauch und LED

Umweltwirkung	Die Festlegung von Gebäudestandards führt zu ressourcenschonenden Bauweisen von Logistikgebäuden und kann so langfristig zu verbesserten THG- und Energiebilanzen beitragen, wenn auch in vergleichsweise geringem Maße.
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Lagerlogistik, Politik
-------------------------	------------------------

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Lagerei, Gebäude	Zuordnung Netzwerk (AP3): -
--	-----------------------------

Literaturangabe:
Richter, N. et al. (2020): Logistik und Immobilien 2020. bulwiengasa AG, Berlin

44 | Gebäudestandards für Lagerlogistik

Freis, J. (2017): Wechselwirkungen und Auswirkungen von Planungsalternativen auf die Gesamtenergiebilanz und die CO₂-Emissionen von Logistikzentren. Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München.

6.7 Lagernutzung

Ebene 2: Standortwahl

45 | Dezentralisierung von Produktion und Lagerhaltung

Verlagerung der Produktion, Lagerhaltung und des Verkaufs näher zu den Kunden bzw. Verbrauchern. Beispielsweise weiten mehr und mehr Einzelhändler das Bestandsmanagement auf die Geschäfte aus.

Auswirkung auf Netzwerkoptimierung

Umweltwirkung	Eine Verringerung der Transportkilometer, eine geringere Lagerfläche und somit eine höhere Lagerauslastung kann sich positiv auf entsprechende Umwelteffekte auswirken
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Unternehmen
-------------------------	-------------

Zeithorizont	lang- und mittelfristig
--------------	-------------------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: hohes Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): -	Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr / Schnittstelle zu Regionalverkehren
---------------------------------	---

Literaturangabe:

ALICE (2019): A framework and process für the development of a roadmap towards zero emissions logistics 2050

McKinnon, A., Cullinane, S., Browne, M., Whiteing, A. (2010): Green Logistics. Improving the environmental sustainability of logistics. 1. Auflage. Kogan Page Publishers. London, Philadelphia, New Delhi.

6.8 (Digitale) Prozessoptimierung

Ebene 2: Organisation intern

46 | Zentrale Organisation von Transporten im Unternehmen

Durch die Schaffung von einem zentralen, geschäftsbereichsübergreifenden Logistiknetzwerk kann eine effiziente Transportbündelung realisiert werden. Hierbei werden die Lieferanten nach ihrer Nähe und aufgrund von optimalen Transportauslastungen ausgewählt.

Auswirkung auf Fahrzeugauslastung, Reduktion von Leerfahrten, Netzwerkoptimierung und Transportbündelung

Umweltwirkung	Lieferanten und Logistikdienstleister können mit maximalen Bündelungseffekten ausgewählt werden, und so Transporte optimal ausgelastet und THG-Emissionen reduziert werden.
---------------	---

46 | Zentrale Organisation von Transporten im Unternehmen

Adressierte Stakeholder	Unternehmen	
Zeithorizont	langfristig	
Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: mittleres Anwendungsspektrum	
Zuordnung Supply Chain (AP2): Beschaffung	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar	
Literaturangabe: BOSCH (2017): Bosch Global Logistics - Striving for Supply Chain Excellence, Gerlingen-Schillerhöhe		

Ebene 2: Telematik

47 | Intelligente Telematik

Telematik ist eine Technologie, die Sensor-, Telekommunikations- und GNSS-Informationen (bspw. Zeit und Ort) kombiniert, um die Leistung von Fahrer und Fahrzeug von der Zentralbehörde oder Dispatching-Einheit aus zu überwachen. Durch den Einsatz dieser Kommunikationssysteme können Lkw-Flotten ihre Betriebseffizienz verbessern, die Sicherheit der Fahrer erhöhen und kostspielige Fahrzeugreparaturen reduzieren. Telematik wird oft mit umfassenderen Transportmanagementsystemen (TMS) kombiniert.

Auswirkung auf Fahrzeugauslastung, Routenoptimierung, Reduktion von Leerfahrten, Netzwerkoptimierung, Verminderung von Fahrten, Transportbündelung, Stauvermeidung durch zeitliche Entzerrung und kombinierter Verkehr

Umweltwirkung	Erhöhte Effizienz im operationalen Geschäft und Verminderung von Verschleiß und Verbrauch. Treibstoffeinsparungen von ca. 5%.	
Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister, Verlader	
Zeithorizont	kurzfristig	
Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum	
Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Verkehrsträgerübergreifend	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar	
Literaturangabe: ALICE (2019): A framework and process für the development of a roadmap towards zero emissions logistics 2050		

Ebene 2: Organisation extern

48 | Synchronmodality

Optimierung und flexible Nutzung der verschiedenen Verkehrsträger und Routen in einem Netzwerk unter der Leitung eines Logistikdienstleisters, so dass dem Kunden (Verlader oder Spediteur) eine integrierte Lösung für seinen (Binnen-)Transport angeboten wird. Dazu gehört auch die Kombination von Gütern mit unterschiedlichen zeitlichen Anforderungen (d.h. die Nutzung des Netzwerks wird maximiert).

48 | Synchronmodality

Auswirkung auf Modal Split, Routenoptimierung, Netzwerkoptimierung, Vermeidung von Fahrten, Transportbündelung und Kombiniertes Verkehr

Umweltwirkung	Effiziente Nutzung von vorhandenen Ressourcen durch erhöhte Auslastung und bessere Koordination. Mittelfristig können GHG-Emissionen um mehr als 20% reduziert werden.
---------------	--

Adressierte Stakeholder	ERP-Supplier
-------------------------	--------------

Zeithorizont	mittelfristig
--------------	---------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Verkehrsträgerübergreifend	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangabe:

ALICE (2019): A framework and process für the development of a roadmap towards zero emissions logistics 2050

McKinnon, A. (2018): Decarbonizing Logistics: climate change - nature and scale of the challenge

Cunha, J. (...): Synchronmodality as a solution to improve the efficiency in freight transportation. Online: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997257078/Extended%20Abstract.pdf>

Agbo, A.; Zhang, Y., Song, T. (2017): Sustainable freight transport optimisation through synchronodal networks. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311916.2017.1421005>

49 | Offene Lager- und Transportnetzwerke

Bei dieser Lösung wird eine systemische Lastkonsolidierung und -optimierung angestrebt, bei der die Kapazitäten in Logistikstandorten und Transportnetzwerken optimiert und für die Nutzung durch die Beteiligten zur Verfügung gestellt werden könnten. Dies schließt die Möglichkeit eines anderen Ansatzes ein, bei dem die Warenströme von verschiedenen Logistikdienstleistern kombiniert werden: Multi-Supplier-Multi-Retailer.

Auswirkung auf Netzwerkoptimierung

Umweltwirkung	Steigerung der Lagerauslastung und kein Zwang zur eigenen Lagerhaltung
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister
-------------------------	-----------------------

Zeithorizont	mittelfristig
--------------	---------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Verkehrsträgerübergreifend	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangabe:

ALICE (2019): A framework and process for the development of a roadmap towards zero emissions logistics 2050

Ebene 2: Crowd Logistics

50 | Crowd-Shipping

Anwerbung von Bürgern als Kuriere, die ihre privaten Fahrzeuge benutzen, um Pakete entlang der Routen, die sie ohnehin nehmen, abzuholen und abzugeben. Durch die Nutzung von anderweitig bestehenden oder notwendigen Fahrten fallen dedizierte Lieferfahrten, die durch einen Logistikdienstleister ausgeführt werden, weg.

Auswirkung auf Fahrzeugauslastung, Netzwerkoptimierung, Verminderung von Fahrten und Transportbündelung

Umweltwirkung	Positive Umweltwirkungen durch Wegfall von Kurierfahrten und kombinierter Nutzung von Privat-Pkw
---------------	--

Adressierte Stakeholder	KEP-Dienstleister, Privatpersonen
-------------------------	-----------------------------------

Zeithorizont	mittelfristig
--------------	---------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: spezifisches Anwendungsspektrum
-------------------------	--

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar (v.a. Nahverkehre)
---	---

Literaturangabe:

Kaup, S., Demircioglu, A. (2017): Von der Crowd-Logistik hin zu einem ganzheitlichen Ansatz hocheffizienten Warentransports. In: Wirtschaftsinformatik & Management 3, S. 18-26

Melkonyan, A. et al. (2020): Sustainability assessment of last-mile logistics and distribution strategies: The case of local food networks. In: International Journal of Production Economics 228, S. 1-17

Ebene 2: Routing

51 | Steuerung von Frachtrouten (durch Digitalisierung)

Die Steuerung von bestimmten Routen für den Warentransport reduziert die Konflikte zwischen Autos und LKWs. Durch digitale Ermittlung der besten Route für LKWs kann eine effiziente Warenlieferung erfolgen. Mithilfe von IT und Echtzeitwerten kann die Routenführung deutlich verbessert werden.

Auswirkung auf Routenoptimierung und Stauvermeidung durch zeitliche Entzerrung

Umweltwirkung	intelligente Frachtrouten-Optimierung in Wien: 60 % Zeitreduktion, 15 % Streckenkürzung, 20 % Emissions- und Kraftstoffreduzierung, 30% Kostenreduktion.
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Kommunen
-------------------------	----------

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Verkehrsträgerübergreifend	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangabe:

Letnik, T. et al. (2018): Review of policies and measures for sustainable and energy efficient urban transport. In: Energy 163 (15), S. 245-257

51 | Steuerung von Frachtrouten (durch Digitalisierung)

Erdinch, H.; Huang, C. (2014): City Logistics Optimization: Gotheburg Inner City Freight Delivery. Masterarbeit. University of Gothenburg, School of Business, Economics and Law. S. 44f.

52 | Routenoptimierung in Echtzeit

Reduktion von THG-Emissionen durch Echtzeit-Routenoptimierung auf First & Last Mile. Dabei können THG-Emissionen besonders durch einen effizienten Verkehrsfluss und geringere Stauzeiten gesenkt werden.

Auswirkung auf Fahrzeugauslastung, Routenoptimierung und Transportbündelung

Umweltwirkung	hohes Einsparungspotenzial bei THG-Emissionen durch effiziente Routen und höhere Transportauslastungen
---------------	--

Adressierte Stakeholder	KEP-Branche
-------------------------	-------------

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Verkehrsträgerübergreifend	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangabe:

Letnik, T. et al. (2018): Review of policies and measures for sustainable and energy efficient urban transport. In: Energy 163 (15), S. 245-257

53 | Intelligentes Ladungssystem

IT-gestützte Flotten- und Ladungssteuerung sowie verbesserte Touren-, Anschluss- und Ressourcenplanung. Weiterhin können durch Telematik-Systeme erhobene Daten integriert und ausgewertet werden, und so die Effizienz von Fahrern und Fahrzeugen entsprechend optimiert werden.

Auswirkung auf Routenoptimierung, Netzwerkoptimierung und Fahrzeugeffizienz

Umweltwirkung	ausgeprägte Planungs- und Kommunikationsmöglichkeiten führen zu steigender Transporteffizienz und somit zu geringeren THG-Emissionen (Treibstoffeinsparungen im Case Study Unternehmen bei 5%)
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Logistik
-------------------------	----------

Zeithorizont	kurzfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Verkehrsträgerübergreifend	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangabe:

Altanzi-Kotula, A. et al. (2016): Nachhaltig bewegen mit BLG Logistics. In: Lochmahr, A. (Hrsg.): Grüne Automobillogistik, Springer Verlag, Stuttgart, S. 133-157

6.9 Finanzielle Anreize

Ebene 2: Internalisierung

54 | Internalisierung der Schadstoff-/Umweltwirkung

Die Umweltwirkungen der Fahrzeuge (=externe Kosten) könnten internalisiert und auf die Unternehmen umgelegt werden, um so die volkswirtschaftlichen Kosten eines Transports zu berücksichtigen. Hierdurch würde der Anteil an umweltfreundlichen Transportmitteln steigen, da die Unternehmen direkt für entstandene Umweltkosten aufkommen müssen.

Auswirkung auf Modal Split, Fahrzeugauslastung, Routenoptimierung, Reduktion von Leerfahrten, Verminderung von Fahrten, Transportbündelung, Kombiniertes Verkehr und Verlangsamung

Umweltwirkung	Durch steigende Kosten von negativen Umweltauswirkungen kann es profitabler sein auf nachhaltige Verkehrsmittel umzurüsten. Je nach Gütergruppe können einer Studie nach bis zu 4,3% Emissionen eingespart werden.
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Staat und Unternehmen
-------------------------	-----------------------

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Beschaffung	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangaben:

Mosert, M., Caris, A., Limbourg, S. (2017): Road and intermodal transport performance: the impact of operational costs and air pollution external costs. In: Research in Transportation Business & Management 23, S. 75-85

Tavasszy, L.A.; Bulavskaya, T.; Ivanova, O. (2016): Effect of a Full Internalization of External Costs of Global Supply Chains on Production, Trade and Transport. Transport Research Arena 2014. Paris.

Blechsmidt, J., Reher, J., Thaller, C., Kotzagiorgis, S., Jödden, C., Sauer, A., Führer, M (2022): Handlungsoptionen für eine ökologische Gestaltung der Transportmittelwahl im Güterfernverkehr. Abschlussbericht, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Ebene 2: Maut

55 | Einführung und Ausweitung von Gebühren für Straßennutzung, Bahntrassen und Häfen

Die Nutzung von bestimmter Infrastruktur kann mit Kosten beaufschlagt werden. Hierdurch wird die Nutzung von ausgewählten Verkehrsmitteln kostspieliger, sodass umweltfreundliche Verkehrsmittel kostentechnisch bevorzugt werden. Daraus ergibt sich eine steigende Nachfrage nach umweltfreundlichen Alternativen und somit positive Umweltauswirkungen.

Auswirkung auf Modal Split, Fahrzeugauslastung, Routenoptimierung, Reduktion von Leerfahrten, Verminderung von Fahrten, Transportbündelung, Kombiniertes Verkehr und Verlangsamung

Umweltwirkung	Abhängig der Höhe des Kostensatzes und des betroffenen Verkehrsträgers, bzw. einer Kombination dieser, können zwischen 1,4 bis 14,2 % CO ₂ eingespart werden.
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Staat und Unternehmen
-------------------------	-----------------------

55 | Einführung und Ausweitung von Gebühren für Straßennutzung, Bahntrassen und Häfen

Zeithorizont	mittelfristig	
Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum	
Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Verkehrsträgerübergreifend	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar	
Literaturangabe: Vierth, I. et al. (2018): How to achieve less emissions from freight transport in Sweden. In: Maritime Business Review 4 (1), S. 5-15 Santos, G.; Rojey, L.; Newbery, D. (2000): The environmental benefits from road pricing. Department of Applied Economics. Cambridge Blechschmidt, J., Reher, J., Thaller, C., Kotzagiorgis, S., Jödden, C., Sauer, A., Führer, M (2022): Handlungsoptionen für eine ökologische Gestaltung der Transportmittelwahl im Güterfernverkehr. Abschlussbericht, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.		

6.10 Transportbedarf

Ebene 2: Green Sourcing

56 | Local Sourcing

Beschaffung von Waren und Dienstleistungen bei Lieferanten aus der geografischen Nähe des Unternehmens, um so die Transportzeiten und -strecken zu reduzieren.

Auswirkung auf Routenoptimierung, Vermeidung von Fahrten und Nachhaltigkeitskriterien bei der Auswahl von Partnern

Umweltwirkung	zahlreiche Vorteile wie etwa geringere Transportkosten, kurze Lieferzeiten und daraus resultierend geringere Umweltbelastungen durch den Transport	
Adressierte Stakeholder	Unternehmen	
Zeithorizont	kurzfristig	
Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum	
Zuordnung Supply Chain (AP2): Beschaffung	Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr / Schnittstelle zu Regionalverkehren	
Literaturangabe: ALICE (2019): A framework and process for the development of a roadmap towards zero emissions logistics 2050		

57 | Lieferantenauswahl nach Nachhaltigkeitskriterien

Lieferanten werden nach vorher festgelegten nachhaltigen Kriterien und Zielvorgaben ausgewählt. So wird zum einen die Umweltbilanz des Unternehmens verbessert, zum anderen werden die Lieferanten gezwungen ihre eigene Produktion nachhaltiger zu gestalten. So kann die Umweltbilanz von mehreren Unternehmen positiv beeinflusst werden.

57 | Lieferantenauswahl nach Nachhaltigkeitskriterien

Auswirkung auf Netzwerkoptimierung und Nachhaltigkeitskriterien bei der Auswahl von Partnern

Umweltwirkung	Einsparungen variieren je nach Position in der Wertschöpfungskette oder Art der Vorprodukte
---------------	---

Adressierte Stakeholder	Unternehmen
-------------------------	-------------

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Beschaffung	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Ebene 2: Standortwahl

58 | Localisation und nearshoring

Verlegung der Produktion in die Nähe des Verbrauchs, wo dies möglich ist, wie z. B. bei landwirtschaftlichen Erzeugnissen, und Verlagerung von eingehenden Materialien näher an die Fertigung. Transportwege zwischen den einzelnen Wertschöpfungsstufen bzw. zwischen Erzeuger und Verbraucher können so reduziert, und dadurch THG-Emissionen verringert werden.

Auswirkung auf Routenoptimierung, Verminderung von Fahrten und Netzwerkoptimierung

Umweltwirkung	Einsparung von THG-Emissionen durch kürzere Transportstrecken. Bspw. konnte ein Automobilhersteller durch einen neuen Hafen Landverkehre deutlich verringern und somit eine Einsparung von CO ₂ um 10% erreichen.
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Verlader
-------------------------	----------

Zeithorizont	kurzfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): -	Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr / Schnittstelle zum Regionalverkehr
---------------------------------	--

Literaturangabe:
ALICE (2019): A framework and process for the development of a roadmap towards zero emissions logistics 2050

59 | Verlagerung der Produktionsstandorte

Hier wird u. a. untersucht, ob eine Verlagerung von Produktionsstandorten näher an Verbraucher, Zulieferer bzw. Absatzmärkte Emissionen einsparen kann. Dies kann besonders durch verkürzte Transportwege und Transportbündelungen geschehen.

Auswirkung auf Routenoptimierung und Netzwerkoptimierung

Umweltwirkung	Eventuelle Emissionseinsparungen durch Verkürzung der Transportwege. Eventuelle Emissionseinsparungen durch Verkürzung der Transportwege
---------------	--

59 | Verlagerung der Produktionsstandorte

Adressierte Stakeholder	Unternehmen	
Zeithorizont	langfristig	
Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: hohes Anwendungsspektrum	
Zuordnung Supply Chain (AP2): -	Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr / Schnittstelle zum Regionalverkehr	
Literaturangabe: VAUDE (2021): Nachhaltigkeitsbericht 2020 – VAUDE, Tettngang URL: https://nachhaltigkeitsbericht.vaude.com/gri/umwelt/warenlogistik.php (aufgerufen am 10.08.2021)		

60 | Einrichtung städtischer Umschlags-/Verteilungszentren

Die Waren werden in großen Mengen in den Logistikzentren (Urban Distribution Centers) zusammengeführt und mit umweltfreundlichen Fahrzeugen an ihren Bestimmungsort transportiert.

Auswirkung auf Modal Split, Fahrzeugauslastung, Reduktion von Leerfahrten, Verminderung von Fahrten und Transportbündelung

Umweltwirkung	Beispielprojekt in London im Bausektor: Einsparung der CO ₂ -Emissionen um 70-80 % und Reduzierung der eingesetzten Fahrzeuge zu Baustellen um 70 %. Ein weiteres Beispiel aus dem KEP-Bereich berichten von einer Streckenreduktion um 20% pro Paket und -62% Emissionen pro Paket in London, bzw. eine Emissionsreduktion bis zu 85% und Streckenreduktion pro Lieferung um 5% in Paris.	
Adressierte Stakeholder	Kommunen	
Zeithorizont	langfristig	
Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: mittleres Anwendungsspektrum	
Zuordnung Supply Chain (AP2): -	Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr / Schnittstelle zum Regionalverkehr	
Literaturangabe: Letnik, T. et al. (2018): Review of policies and measures for sustainable and energy efficient urban transport. In: Energy 163, S. 245-257		
Erdinch, H.; Huang, C. (2014): City Logistics Optimization: Gotheburg Inner City Freight Delivery. Masterarbeit. University of Gothenburg, School of Business, Economics and Law		

Ebene 2: Prozessoptimierung Produktion

61 | 3D-printing

3D-Druck von Ersatzteilen, ausgewählten Produkten oder Teilen von Produkten, die mit einer marktnäheren Fertigung kombiniert werden können. Somit können Transportwege und -volumina reduziert und THG-Emissionen verringert werden.

Auswirkung auf Routenoptimierung und Verminderung von Fahrten

Umweltwirkung	kürzere Transportwege und lokale Konzentration der Fertigung führen zu geringeren THG-Emissionen
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Verlader
-------------------------	----------

Zeithorizont	kurzfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: mittleres Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Straße	Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr / Schnittstelle zum Regionalverkehr
---	--

Literaturangabe:

ALICE (2019): A framework and process for the development of a roadmap towards zero emissions logistics 2050

62 | Dematerialisation

Reduzierung der physischen Menge an Gütern, Produkten und Verpackungen, die benötigt werden, um dem Verbraucher einen Mehrwert zu bieten. Möglichkeiten sind die Neugestaltung von Produkten, Abfallminimierung, Recycling, Digitalisierung, Miniaturisierung, Materialsubstitution und die Verschiebung der Verbreitung von Produkten auf neue Märkte.

Auswirkung auf Vermeidung von Transportverpackung, Recycling und Beschaffung umweltfreundlicher Materialien

Umweltwirkung	nachhaltigere Gestaltung von Produkten, Prozessen und Verpackungsmaterialien führen zu reduzierten Umweltauswirkungen
---------------	---

Adressierte Stakeholder	Verlader
-------------------------	----------

Zeithorizont	kurz-, mittel- und langfristig
--------------	--------------------------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: breit
-------------------------	----------------------------

Zuordnung Supply Chain (AP2): Beschaffung	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangabe:

Dittrich, M. et al. (2018): Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz: Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität (DeteRes). In: Umweltbundesamt Texte 29/2018, Abschlussbericht, Dessau-Roßlau.

Ebene 2: Organisation extern

63 | Öffentliche Darlegung von Liefer- und Serviceplänen (DSPs)

Die Delivery and Servicing Plans legen dar, wie der Warentransport von Unternehmen organisiert ist. Da der Güterverkehr innerhalb eines Unternehmens oft von verschiedenen unabhängigen Sektoren verwaltet wird, sind Logistikaktivitäten nicht effizient. Der Hauptzweck dieser Maßnahme besteht darin, Flotten- und Frachtnachfrage zu optimieren und die Anzahl unnötiger Fahrten zu reduzieren. Unternehmen im gleichen Stadtteil können ihren Warentransport bündeln. Auch Lieferzeiten können optimiert werden, was zu einer Reduktion von Energieverbrauch, Emissionen und Staus führen kann.

Auswirkung auf Fahrzeugauslastung, Reduktion von Leerfahrten, Verminderung von Fahrten, Transportbündelung und Stauvermeidung durch zeitliche Entzerrung

Umweltwirkung	Reduktion von Kosten und Emissionen
---------------	-------------------------------------

Adressierte Stakeholder	Unternehmen und Kommunen
-------------------------	--------------------------

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: generisches Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport, Verkehrsträgerübergreifend	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
---	--

Literaturangabe:
 Letnik, T. et al. (2018): Review of policies and measures for sustainable and energy efficient urban transport. In: Energy 163, S. 245-257

Ebene 2: Logistikfläche

64 | Einbeziehen und Reservieren von optimalen Logistikstandorten in der Stadt- und Regionalplanung

Gebiete entlang Bahnstrecken oder Kanälen können in der Stadt- und Regionalplanung für die Logistik reserviert werden. Eine systematische Zuweisung von Logistikflächen ermöglicht die Entwicklung von Skaleneffekten bei den Logistikaktivitäten und mildert die Zersiedelung der Logistik. Die Maßnahme fördert auch den multimodalen Verkehr, durch den eine erhöhte Transporteffizienz erreicht werden kann.

Auswirkung auf Modal Split, Netzwerkoptimierung und Transportbündelung

Umweltwirkung	Wegfall von Transportkilometern und Reduktion von Stauzeiten führen zu niedrigerem CO ₂ -Ausstoß im Transport
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Kommunen
-------------------------	----------

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: mittleres Anwendungsspektrum
-------------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): -	Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr / Schnittstelle zum Regionalverkehr
---------------------------------	--

Literaturangabe:
 Letnik, T. et al. (2018): Review of policies and measures for sustainable and energy efficient urban transport. In: Energy 163, S. 245-257

65 | Mobile Logistiklager

Ein Anhänger/ Transporter wird im Warenlager außerhalb der Stadt beladen und dann in zentraler Stadtlage geparkt. Er fungiert also als eine Art Mikro-Depot von dem aus Lastenräder oder ähnliches die Ware verteilen können.

Auswirkung auf Modal Split und Routenoptimierung

Umweltwirkung	In Brüssel: Reduzierung von CO ₂ um 24 % und PM ₁₀ um 22 %
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Logistikdienstleister und Städte
-------------------------	----------------------------------

Zeithorizont	kurzfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: spezifisches Anwendungsspektrum
-----------------------	--

Zuordnung Supply Chain (AP2): -	Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr / Schnittstelle zu Regionalverkehren
---------------------------------	---

Literaturangabe:

Letnik, T. et al. (2018): Review of policies and measures for sustainable and energy efficient urban transport. In: Energy 163, S. 245-257

66 | Offroad Ladezonen

Die Errichtung von abseitsgelegenen Ladezonen soll öffentliche Räume entlasten und führt zu effizienten Be- und Entladevorgängen in Städten. Besonders schlägt sich dies in deutlich verkürzten Lieferzeiten nieder, was die Beispiele Rom und Paris aufzeigen.

Auswirkung auf Routenoptimierung und Transportbündelung

Umweltwirkung	Hauptsächlich Verringerung der Lieferzeiten und somit gesteigerte Transporteffizienz
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Unternehmen und Stadtplanung
-------------------------	------------------------------

Zeithorizont	mittelfristig
--------------	---------------

Wirkungsweise: direkt	Breite der Maßnahme: mittleres Anwendungsspektrum
-----------------------	---

Zuordnung Supply Chain (AP2): -	Zuordnung Netzwerk (AP3): Nahverkehr
---------------------------------	--------------------------------------

Literaturangabe:

Letnik, T. et al. (2018): Review of policies and measures for sustainable and energy efficient urban transport. In: Energy 163, S. 245-257

6.11 Verpackung

Ebene 2: Verpackung

67 | Neue Verpackungssysteme

Reduktion des Verpackungsaufwandes durch Vermeidung von Einwegverpackung und durchgängig recyclingfähige Verpackungsmaterialien. So kann die Umweltbelastung sowohl in der Produktion als auch bei der Verbrennung nicht-recyclingfähiger Materialien gesenkt werden sowie Transporte effizienter ausgelastet werden.

Auswirkung auf Fahrzeugauslastung und Ladungsträger

Umweltwirkung	Durch den Einsatz neuer Verpackungssysteme kann der Materialverbrauch in der Logistik deutlich gesenkt und eine Verdichtung der Waren ermöglicht werden. (Reduktion des Transportvolumens und eine bessere Auslastung von Lkw- oder Seefrachtcontainer)
---------------	---

Adressierte Stakeholder	Logistik und Automotive
-------------------------	-------------------------

Zeithorizont	langfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: breit
-------------------------	----------------------------

Zuordnung Supply Chain (AP2): Verpackung	Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar
--	--

Literaturangabe:

Casper, R., Sundin, E. (2018): Reverse Logistic Transportation and Packaging Concepts in Automotive Remanufacturing. In: Procedia Manufacturing 25, S. 154-160

Becker, T., Funke, T., Cordes, J. (2018): Auslastungsmessung in LKW-Laderäumen. Ein Überblick über vorhandene Technologien und ein Praxistest mit Ultraschallsensorik in der Automobillogistik. In: Industrie 4.0 Management 34, S. 30-32

Grace, R. (2018): Auf der Überholspur: geringeres Gewicht und optimierte Logistik mit Mondis Lösungen für die Automobilindustrie. FachPack 2018.

68 | Effiziente Verpackung und flexible Anpassung an Lieferfahrzeuge

Eine effiziente Verpackung und höhere Dichte im Laderaum (bspw. durch flexible Verpackungen) vermindern den Platzbedarf und steigern gleichzeitig die Transportauslastung bzw. -kapazität. So können zum einen durch effiziente Verpackungsmaterialien aber auch durch eine gesteigerte Effizienz die negativen Umweltauswirkungen reduziert werden.

Auswirkung auf Fahrzeugauslastung, Reduktion von Leerfahrten und Fahrzeuggeometrie

Umweltwirkung	Verbesserung der Transportauslastung durch höhere Dichte im Laderaum und durch Gewichtseinsparungen bei Verpackungsmaterialien. In Frankreich konnte ein Lebensmittelhersteller eine bessere Fahrzeugauslastung um 35-41% erreichen durch veränderte Verpackungen. In UK reduzierte eine Supermarkt Verpackungsmaterial eigener Produkte um 25%.
---------------	--

Adressierte Stakeholder	Unternehmen
-------------------------	-------------

Zeithorizont	kurzfristig
--------------	-------------

Wirkungsweise: indirekt	Breite der Maßnahme: hohes Anwendungsspektrum
-------------------------	---

68 | Effiziente Verpackung und flexible Anpassung an Lieferfahrzeuge

Zuordnung Supply Chain (AP2): Transport & Verpackung

Zuordnung Netzwerk (AP3): Einsatz in allen Typen denkbar

Literaturangabe:

ALICE (2019): A framework and process for the development of a roadmap towards zero emissions logistics 2050

7 Quellenverzeichnis

- ALICE. (2019). *Roadmap towards Zero Emissions Logistics 2050*. Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe. <http://www.etp-logistics.eu/wp-content/uploads/2019/12/Alice-Zero-Emissions-Logistics-2050-Roadmap-WEB.pdf>
- Allekotte, M., Bergk, F., Biemann, K., Deregowski, C., Knörr, W., Althaus, H.-J., Sutter, D., Bergmann, T. (2019). *Ökologische Bewertung von Verkehrsarten*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Allekotte, M., Heidt, C., Knörr, W., Kotzagiorgis, S., Schneider, W. (2021). *Modellintegration des Transport-Visualisierungsmodells (TraViMo) und dem Transport Emission Model (TREMODO)* (3720 58 106 0). ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, TTS TRIMODE Transport Solutions GmbH.
- Allekotte, M., Heidt, C., Schneider, C., Toenges-Schuller, N. (2022). *Bewertung von Emissionsminderungspotenzialen zusätzlicher Verkehrsmaßnahmen* [Sachverständigengutachten]. ifeu gGmbH, AVISO GmbH.
- Allianz pro Schiene. (2016). *740-Meter-Schienennetz: Wie der Güterzug länger werden kann*. <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/aktuell/740-meter-gueterzug/>
- Altmann, S., Bastian, P. (2019). *DHL Global Connectedness Index. Mapping the Current State of Global Flows*. Deutsche Post DHL Group.
- Arnold, D., Kuhn, A., Furmans, K. (2008). *Handbuch Logistik*. Springer Berlin Heidelberg.
- Asdecker, B. (2022). *Statistiken Retouren Deutschland—Definition*. http://www.retourenforschung.de/definition_statistiken-retouren-deutschland.html
- BBSR. (2019). *Vergleichswerte für den Energieverbrauch von Nichtwohngebäuden* (BBSR-Online-Publikation Nr. 20/2019; S. 183).
- BDLI. (2020). *Nachhaltige und klimaneutrale Luftfahrt aus Deutschland für die Energiewende am Himmel – Technologiestrategie der deutschen Luftfahrtindustrie*. Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e. V. https://www.bdli.de/sites/default/files/2020-09/TechStrategie_2020_3.pdf
- Bergk, F., Dünnebeil, F., Greinus, A., Ickert, L., Peter, M. (2021). *Klimaschutzbeitrag alternativer Verkehrsträger – Potenziale und Anforderungen*. ifeu, INFRAS.
- Bettgenhäuser, K., Boermans, T. (2011). *Umweltwirkung von Heizungssystemen in Deutschland* (S. 91). Ecofys Germany GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4070.pdf>
- Bichler, K., Krohn, R., Philippi, P., Schneiderei, F. (2017). *Kompakt-Lexikon Logistik. 2.250 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden*. (3. Aufl.).
- BIEK. (2022). *KEP-Studie 2021 – Analyse des Marktes in Deutschland*. Bundesverbandes Paket und Expresslogistik e. V. <https://www.biek.de/publikationen/studien.html>
- bitkom. (2019). *Digitalisierung in der Logistik*. https://www.bitkom.org/sites/default/files/2019-06/bitkom-charts_digitalisierung_der_logistik_03_06_2019.pdf
- Blehschmidt, J., Reher, J., Thaller, C., Liedtke, G., Kotzagiorgis, S., Jödden, C., Sauer, A., Führer, M. (2022). *Handlungsoptionen für eine ökologische Gestaltung der Transportmittelwahl im Güterfernverkehr* (TEXTE 50/2022). DLR, TTS TRIMODE, Kantar im Auftrag vom Umweltbundesamt. 29.03.2023
- BMDV. (2018). *Langlebigkeit der Flotten*. Forschungs-Informationssystem. <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/483835/>
- BMVI. (2016). *Bundesverkehrswegeplan 2030—740 m-Programm (Projekt 2-050-V01)*. https://www.bvwprojekte.de/schiene_2018/2-050-V01/2-050-V01.html

- Bovensiepen, G., Fink, H., Schnücker, P., Rumpff, S., Raimund, S. (2018). *Verpackungen im Fokus—Die Rolle von Circular Economy auf dem Weg zu mehr Nachhaltigkeit*. PricewaterhouseCoopers AG.
- Bretzke, W.-R. (2015). *Logistische Netzwerke*. Springer Berlin Heidelberg.
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2022). *Starkes Wachstum im Wärmepumpenmarkt*. <https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/starkes-wachstum-im-waermepumpenmarkt/#content>
- Clausen, U., Geiger, C. (2013). *Verkehrs- und Transportlogistik*. Springer Berlin Heidelberg.
- Continental Mobilitätsstudie 2016—Der vernetzte Truck*. (2016). Continental AG.
- DB Netze. (2018). *Stand 740m-Netz*. https://www.netzwerk-bahnen.de/assets/files/downloads/2018_juni-planungsstand-db-740-meter-netz.pdf
- Deckert, C. (2016). *CSR und Logistik: Spannungsfelder Green Logistics und City-Logistik*. Springer.
- dena. (2021). *Dena-Gebäudereport 2022*. Deutsche Energie-Agentur (dena). https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/dena-Gebaeudereport_2022.pdf
- DLR, ifeu, LBST, DBFZ. (2016). *Verkehrsverlagerungspotenzial auf den Schienengüterverkehr in Deutschland* (Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima, S. 120). Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ). https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/studie-verkehrsverlagerungspotenzial-schienengueterverkehr.pdf?__blob=publicationFile
- Dörfelt, S., Scherf, J. (2018, März 6). *Leerkilometer und Leerfahrten—Wie man sie reduziert und vermeidet*. <https://www.mm-logistik.vogel.de/leerkilometer-und-leerfahrten--wie-man-sie-reduziert-und-vermeidet-a-673353/>
- Dünnebeil, F., Reinhard, C., Lambrecht, U., Kies, A., Hausberger, S., Rexeis, M. (2015). *Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasreduzierung bei schweren Nutzfahrzeugen* (S. 213) [UBA TEXTE 32/2015]. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg.
- EcoTransIT. (2022). *Emissionsrechner für Treibhausgase und Luftschadstoffe*. <https://www.ecotransit.org/de/emissionsrechner/>
- Europäische Kommission. (2011). *WEISSBUCH Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem* (KOM/2011/0144 endg.).
- Europäische Kommission. (2023). *Directive of the European Parliament and of the Council amending Council Directive 96/53/EC laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorised dimensions in national and international traffic and the maximum authorised weights in international traffic* (COM(2023) 445/2; S. 62). European Commission. https://transport.ec.europa.eu/system/files/2023-07/COM_2023_445_0.pdf
- eurostat. (2021). *A fifth of road freight kilometres by empty vehicles*. <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/-/ddn-20211210-1>
- Faber, J., Hanayama, S., Zhang, S., Pereda, P., Comer, B., Hauerhof, E., Schim van der Loeff, W., Smith, T., Zhang, Y., Kosaka, H., et. al. (2020). *Fourth IMO GHG Study*. London, UK.
- Faber, J., Huigen, T., Nelissen, D. (2017). *Regulating speed: A short-term measure to reduce maritime GHG emissions*. CE Delft. <https://cedelft.eu/en/publications/2024/regulating-speed-a-short-term-measure-to-reduce-maritime-ghg-emissions>

Feld, L. P., Carstensen, S., Gerling, M., Wandzik, C., Simons, H. (2021). *Frühjahrgutachten Immobilienwirtschaft 2021*. 16.

Freis, J. (2017). *Wechselwirkungen und Auswirkungen von Planungsalternativen auf die Gesamtenergiebilanz und die CO₂-Emissionen von Logistikzentren*. Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München.

Freundenberg, J., Meyer, H., Bäumer, T., Huber, S., Popovic, T., Schneider, U., Commenges, J., Ebenbeck, L. (2019). *Das Quartier als Schlüssel zur Steigerung der Sanierungsrate—Erkenntnisse aus dem „Drei Prozent Projekt—Energieeffizienter Sanierungsfahrplan für kommunale Quartiere 2050“*. Deutscher Verband für Wohnungswesen, Städtebau und raumordnung e. V., Hochschule für Technik Stuttgart, B.&S.u. Beratungs- und Service-Gesellschaft umwelt mbH. https://www.deutscher-verband.org/fileadmin/user_upload/documents/Brosch%C3%BCren/3_plus-Broschuere_gesamt_FINAL.pdf

Günthner, W. A., Auer, T. (2014). *Das CO₂-neutrale Logistikzentrum: Entwicklung von ganzheitlichen Handlungsempfehlungen für energieeffiziente Logistikzentren*. Technische Universität München / Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik.

Harthan, R. O., Repenning, J., Blanck, R., Böttcher, H., Bürger, V., Cook, V., Emele, L., Görz, W. K., Hennenberg, K., Jörß, W., Ludig, S., Matthes, F. C., Mendelevitch, R., Moosmann, L., Scheffler, M., Wiegmann, K., Brugger, H., Fleiter, T., Mandel, T., ... Steinbach, J. (2020). *Abschätzung der Treibhausgasminde rungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung* (Climate Change 33/2020; S. 320). Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES GmbH.

Haufe. (2021). *E-Commerce: Bis 2025 fehlen 4 Millionen Quadratmeter Lagerfläche*. https://www.haufe.de/immobilien/entwicklung-vermarktung/marktanalysen/logistikimmobilien-boomen-doch-die-flaechen-gehen-aus_84324_420688.html

Heidt, C., Biemann, K., Dünnebeil, F., Jamet, M., Lambrecht, U., Althaus, H.-J., Wüthrich, P., Hausberger, S. (2019). *Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen* [Abschlussbericht]. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-bewertung-von-massnahmen-zur>

Henning, Prof. Dr. H.-M., Knopf, Dr. B., Bettzüge, Prof. Dr. M. O., Heimer, Prof. Dr. T., Schломann, Dr. B. (2021). *Bericht zur Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgasemissionen für das Jahr 2020 | Prüfung und Bewertung der Emissionsdaten gemäß § 12 Abs. 1 Bundes Klimaschutzgesetz*.

Hentschel, K.-M. (2020). *Handbuch Klimaschutz: Wie Deutschland das 1,5-Grad-Ziel einhalten kann: Bd. Anlage 20: Flächenbedarf Photovoltaik*. oekom.

Hoffmann, J. (2020). *Decarbonizing maritime transport: Estimating fleet renewal trends based on ship scrapping patterns*. 85(45). <https://unctad.org/news/decarbonizing-maritime-transport-estimating-fleet-renewal-trends-based-ship-scrapping-patterns>

ifeu. (2009). *Aktualisierung des Modells TREMOD – Mobile Machinery (TREMOD-MM)*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.

ifeu. (2021). *Aktualisierung des „Daten- und Rechenmodells: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland (TREMOD)“ und der Datenbank „Mobile Maschinen und Geräte (TREMOD-MM)“ 2020*. UBA.

ifeu GVM. (2021). *Potenzial der Abfallvermeidung und des Ressourcenschutzes bei Reduktion von übermäßigen Verpackungen*. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH. https://www.vzvb.de/sites/default/files/2021-09/Bericht_Einsparpotenziale_210812.pdf

IndustrialPort. (2012). *Detailwissen Lager-, Logistik- & Produktionsfläche in Deutschland*. <https://www.industrialport.net/blog/2012/08/01/vestibulum-vulputate-tellus/>

- Intraplan. (2014). *Verkehrsverflechtungsprognose 2030—Schlussbericht*.
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030-schlussbericht-los-3.pdf?__blob=publicationFile
- IRU. (2017). *Commercial Vehicle of the Future: A roadmap towards fully sustainable truck operations*. Transport & Mobility Leuven. <https://www.iru.org/sites/default/files/2017-07/iru-report-commercial-vehicle-of-the-future-en%20V2.pdf>
- Irzik, M. (2017). *Feldversuch mit Lang-Lkw in Deutschland*. Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Jackson, R. B., Saunio, M., Bousquet, P., Canadell, J. G., Poulter, B., Stavert, A. R., Bergamaschi, P., Niwa, Y., Segers, A., Tsuruta, A. (2020). Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. *Environmental Research Letters*, 15(7), 071002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2>
- JLL. (2022). *Logistik- und Industriemarktüberblick—Flächenumsatz erreicht neuen Rekord*.
<https://www.jll.de/content/dam/jll-com/documents/pdf/research/emea/germany/de/Logistik-und-Industriemarktueberblick-JLL-Deutschland.pdf>
- joerss, M., Schröder, J., Neuhaus, F., Klink, C., Mann, F. (2016). *Parcel delivery. The future of last mile*. McKinsey&Company.
- Jöhrens, J., Allekotte, M., Heining, F., Helms, H., Räder, D., Köllermeier, N., Waßmuth, V. (2022). *Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030: Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs—My eRoads“* (Gefördert durch Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz.). Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, PTV Group.
- Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J. (2013). *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*.
- Kersten, W., Seiter, M., See, B. von, Hackius, N., Maurer, T. (with Bundesvereinigung Logistik). (2017). *Chancen der digitalen Transformation: Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management*. DVV Media Group GmbH.
- Kersten, W., Seiter, M., von See, B., Hackius, N. (2016). *Trends und Strategien in Supply Chain Management und Logistik – Chancen der digitalen Transformation*. 33.
- Kienzler, H.-P., Gutberlet, T., Labinsky, A., Faltenbacher, M., Eckert, S. (2017). *Analyse des Einsatzes von Lang-Lkw im Hinblick auf seine Klimaeffekte*. Prognos AG und thinkstep AG im Auftrag der LUBW und Daimler AG.
- Kille, C., Meißner, M. (2020). *Logistik 2020—Struktur und Wertewandel als Herausforderung*. DVV Media Group GmbH.
- Klump, M. (2014). *Logistik und demografischer Wandel: Arbeitsmarkt, Arbeitsbedingungen, Entwicklungsrisiken und Handlungsoptionen der Fahrberufe in Deutschland*. DVV Media Group.
- Knörr, W., Allekotte, M., Biemann, K., Heidt, C., Colson, M. (o. J.). *Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018)—Berichtsteil TREMOD* (123 135; S. 205). ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. Abgerufen 15. August 2022, von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-29_texte_116-2020_tremod_2019_0.pdf
- Knörr, W., Heidt, C., Allekotte, M., Biemann, K., Colson, M., Gores, S. (2020). *Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018)—Berichtsteil „TREMOD“*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/aktualisierung-tremod-2019>
- Knudsen, B., Lallana, A. L., Ledermann, L. (2022). *NO_x Emission from Ships in Danish waters—Assessment of Current Emission Levels and Potential Enforcement Models*. Danish Environmental Protection Agency.

- Kohl, A., Pfretzschner, F. (2018). *Logistikmonitor 2018—Der Wirtschaftszweig in Zahlen. Ergebnisse einer Expertenbefragung von Statista und der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.* Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.; Technische Universität München.
- Lindstad, E. (2019). *Increased use of LNG might not reduce maritime GHG emissions at all.* https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2019_06_Dr_Elizabeth_Lindstad_commentary_LNG_maritime_GHG_emissions.pdf
- Luttenberger, D., Punchard, B. (2020). *Global Packaging Trends.*
- Manyika, J., Lund, S., Chui, M. (2017). *Jobs lost, jobs gained: Workforce transitions in a time of automation.* McKinsey&Company.
- Muchna, C., Brandenburg, H., Fottner, J., Gutermuth, J. (2018). *Grundlagen der Logistik. Begriffe, Strukturen und Prozesse.* Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Nebuloni, G., Hernandez, D., Carter, P. (2019). *IDC Servitization Barometer: Charting your path to new revenue streams.* International Data Corporation.
- Pavlenko, N., Comer, B., Zhou, Y., Clark, N., Rutherford, D. (2020). *The climate implications of using LNG as a marine fuel (2020–02; Working Paper, S. 40).* International Council on Clean Transportation (icct). https://theicct.org/sites/default/files/publications/Climate_implications_LNG_marinefuel_01282020.pdf
- Photovoltaik.org. (2022). *Photovoltaik.org.* <https://www.photovoltaik.org/>
- Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M. M. B., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Lösschke, S., Möller, V., Okem, A. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (IPCC, Hrsg.).
- Raddats, Kowalkowski, C., Benedittini, O., Burton, J., Gebauer, H. (2019). *Servitization: A contemporary thematic review of four major research streams.* (S. 207–223).
- Rein, S., Gutberlet, K., Schmalenbach, Y. (2016). *Datenbasis zum Gebäudebestand (BBSR-Analysen Kompakt 09/2016; S. 12).* BBSR. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/analysen-kompakt/2016/ak-09-2016-dl.pdf;jsessionid=7A49574B6312497B9E50CE130C3E1DF4.live11293?__blob=publicationFile&v=1
- Repenning, J. (2021). *Projektionsbericht 2021 für Deutschland* (S. 369).
- Rodenhäuser, B., Rauch, C. (2015). *Supply Chain 2025. Eine Studie des Zukunftsinstituts für den Verband der Wellpappen-Industrie.* Zukunftsinstitut GmbH.
- Rodrigue, J.-P. (2022). *Fuel Consumption by Containership Size and Speed.* The Geography of Transport Systems. <https://transportgeography.org/contents/chapter4/transportation-and-energy/fuel-consumption-containerships/>
- Rüdiger, D. (2014). *Studie zu alternativen Antriebsformen im Straßengüterverkehr. Status Quo und Perspektiven 2014.* Fraunhofer Verlag.
- Saunio, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Raymond, P. A., Dlugokencky, E. J., Houweling, S., Patra, P. K., Ciais, P., Arora, V. K., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D. R., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, K. M., Carrol, M., ... Zhuang, Q. (2020). The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12(3), 1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- Schlomann, B., Kleeberger, H., Geiger, B., Pich, A., Gruber, E., Mai, M., Gerspacher, A., Schiller, W. (2013). *Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010* (53/09; S. 320). Fraunhofer ISI, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IFE), Technische Universität München (TUM), GfK Retail and Technology GmbH, BASE-ING. GmbH, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi).

- Schröder, J., Heid, B., Neuhaus, F., Kässer, M., Klinik, C., Tatomir, S. (2018). *Fast Forwarding last mile delivery. Implications for the ecosystem*. McKinsey&Company.
- Schwemmer, M. (2019). *TOP 100 in European Transport and Logistics Services 2019/2020*. DVV Media Group.
- Schwemmer, M., Dürrbeck, K., Klaus, P. (2020). *TOP 100 der Logistik: Marktgrößen, Marktsegmente und Marktführer* (A. Pflaum, Hrsg.; 2020/2021 Aufl.). DVV Media Group.
- Schwemmer, M., Hempfing, A. (2019). *Fachkräftemangel in der Logistik. Vermessung, Struktur und Handlungsfelder*. Fraunhofer SCS.
- SkySails. (2017). *Skysails Propulsion System—Turn Wind into Profit*. https://skysails-group.com/pdf-assets/SkySailsMarine_Brochure_EN.pdf#page=4&zoom=auto,-311,842
- Stenersen, D., Thonstad, O. (2017). *GHG and NOx emissions from gas fuelled engines*. SINTEF Ocean AS. <https://www.nho.no/siteassets/nox-fondet/rapporter/2018/methane-slip-from-gas-engines-mainreport-1492296.pdf>
- Stolz, B., Held, M., Georges, G., Boulouchos, K. (2021). The CO2 reduction potential of shore-side electricity in Europe. *Applied Energy*, 285, 116425. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116425>
- Swarz, S., Lee, J., Hsia, M., Walentynski, B. (2018). *CDP Supply Chain Report 2017 / 2018*.
- thermondo. (2022). *Wirkungsgrad der Heizung – wichtige Kennzahl für die Effizienz des Heizgeräts*. <https://www.thermondo.de/info/rat/vergleich/wirkungsgrad-der-heizung/>
- Transport & Logistik Kompass*. (2016). PricewaterhouseCoopers AG.
- Tripp, C. (2019). *Distributions- und Handelslogistik. Netzwerke und Strategien der Omnichannel-Distribution im Handel*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- UBA. (2021). *Photovoltaik*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/photovoltaik#photovoltaik>
- Veres-Homm, U., Kübler, A., Cäsar, E., Weber, N. (2015). *Logistikimmobilien – Markt und Standorte 2015*. Fraunhofer Verlag.
- von Storch, H. (2019). *Nachhaltige Kraftstoffe für die Logistik. Status. Perspektiven. Lösungen*. Deutsche Post DHL Group.
- Wiesmann, A. (2010). *Slow steaming – a viable long-term option?* (Wärtsilä Technical Journal 02.2010). <https://www.wartsila.com/docs/default-source/Service-catalogue-files/Engine-Services---2-stroke/slow-steaming-a-viable-long-term-option.pdf>
- Winnes, H., Styhre, L., Fridell, E. (2015). Reducing GHG emissions from ships in port areas. *Research in Transportation Business & Management*, 17, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2015.10.008>
- Wirth, H. (2022). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Fraunhofer ISE. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>
- Zanker, C. (2018). *Branchenanalyse Logistik. Der Logistiksektor zwischen Globalisierung, Industrie 4.0 und Online-Handel*. Hans-Böckler-Stiftung.
- Zapfl, D. (2019). *Lead Innovation Blog – Diese 9 Trends wirbeln die Logistik durcheinander*. <https://www.lead-innovation.com/blog/trends-logistik>
- Zentralkommission für die Rheinschifffahrt. (2012). *Möglichkeiten zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Treibhausgasemissionen in der Binnenschifffahrt*. Bericht des Untersuchungsausschusses zur Herbsttagung 2012. Anlage 2 zu Protokoll 2012-II-4. https://www.ccr-zkr.org/files/documents/rapports/Thg_ber_de.pdf

Anhang

A1. Güterabteilungen nach NST-2007 Ebene 1

Abteilung	Bezeichnung
GA01	Erzeugnisse der Landwirtschaft, Jagd und Forstwirtschaft; Fische und Fischereierzeugnisse
GA02	Kohle; rohes Erdöl und Erdgas
GA03	Erze, Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse; Torf; Uran- und Thoriumerze
GA04	Nahrungs- und Genussmittel
GA05	Textilien und Bekleidung; Leder und Lederwaren
GA06	Holz sowie Holz-, Kork- und Flechtwaren (ohne Rohholz und Möbel); Papier, Pappe und Waren daraus; Verlags- und Druckerzeugnisse, bespielte Ton-, Bild- und Datenträger
GA07	Kokereierzeugnisse und Mineralölerzeugnisse
GA08	Chemische Erzeugnisse und Chemiefasern; Gummi- und Kunststoffwaren; Spalt- und Brutstoffe
GA09	Sonstige Mineralerzeugnisse
GA10	Metalle und Halbzeug daraus; Metallerzeugnisse, ohne Maschinen und Geräte
GA11	Maschinen und Ausrüstungen anderweitig nicht genannt; Büromaschinen, Datenverarbeitungsgeräte und -einrichtungen; Geräte der Elektrizitätserzeugung und -verteilung u. Ä.; Nachrichtentechnik, Rundfunk- und Fernsehgeräte sowie elektronische Bauelemente; Medizin-, Mess-, steuerungs- und regelungstechnische Erzeugnisse; optische Erzeugnisse; Uhren
GA12	Fahrzeuge
GA13	Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte, Spielwaren und sonstige Erzeugnisse
GA14	Sekundärrohstoffe; kommunale Abfälle und sonstige Abfälle
GA15	Post, Pakete
GA16	Geräte und Material für die Güterbeförderung
GA17	Im Rahmen von privaten und gewerblichen Umzügen beförderte Güter; von den Fahrgästen getrennt befördertes Gepäck; zum Zwecke der Reparatur bewegte Fahrzeuge; sonstige nichtmarktbestimmte Güter anderweitig nicht genannt
GA18	Sammelgut: eine Mischung verschiedener Arten von Gütern, die zusammen befördert werden
GA19	Nicht identifizierbare Güter: Güter, die sich aus irgendeinem Grund nicht genau bestimmen lassen und daher nicht den Gruppen 01-16 zugeordnet werden können
GA20	Sonstige Güter anderweitig nicht genannt

Quelle: Verkehr - NST-2007 - Einheitliches Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik - 2007

A2: Detaillierte Verkehrsmengen Straße 2030

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	01	2.219.960	11.099.801	4.808.200	43%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	02	0	0	0	50%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	03	13.769.115	68.845.577	34.946.933	51%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	04	6.908.270	34.541.352	13.946.167	40%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	05	122.142	610.710	183.762	30%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	06	1.621.104	8.105.518	3.118.326	38%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	07	1.413.781	7.068.905	3.468.951	49%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	08	1.668.200	8.341.001	3.311.637	40%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	09	10.738.673	53.693.366	23.880.092	44%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	10	3.599.506	17.997.530	7.476.045	42%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	11	1.497.582	7.487.908	2.688.396	36%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	12	2.308.823	11.544.117	4.305.957	37%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	13	350.716	1.753.581	541.186	31%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	14	22.056.058	110.280.292	47.659.340	43%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	15	895.603	4.478.013	1.579.391	35%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	16	6.643.097	33.215.487	7.321.183	22%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	17	5.472.652	27.363.259	9.614.324	35%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	18	1.245.097	6.225.485	2.275.614	37%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	19	173.416.986	520.262.015	210.106.430	40%
Autobahn	<50km	Lkw 3,5-7,5t	20	0	0	0	50%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	01	9.672.903	48.364.515	19.320.645	40%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	02	0	0	0	50%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	03	42.671.749	213.358.747	99.878.244	47%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	04	23.387.255	116.936.273	43.540.377	37%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	05	1.839.711	9.198.557	2.552.513	28%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	06	7.582.624	37.913.119	13.451.096	35%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	07	4.648.720	23.243.601	10.519.059	45%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	08	6.771.144	33.855.718	12.396.068	37%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	09	38.779.304	193.896.522	79.526.670	41%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	10	15.369.440	76.847.200	29.438.419	38%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	11	8.627.731	43.138.655	14.283.243	33%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	12	9.811.193	49.055.964	16.874.395	34%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	13	1.686.800	8.434.001	2.400.390	28%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	14	70.926.005	354.630.026	141.336.080	40%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	15	3.015.908	15.079.539	4.904.782	33%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	16	29.145.120	145.725.602	29.621.287	20%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	17	19.745.124	98.725.619	31.989.555	32%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	18	4.371.806	21.859.028	7.368.578	34%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	19	628.277.140	1.886.157.472	702.461.604	37%
außerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	20	0	0	0	50%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	01	11.970.457	59.852.287	21.591.944	36%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	02	0	0	0	50%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	03	44.947.316	224.736.578	95.005.866	42%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	04	25.896.160	129.480.799	43.537.603	34%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	05	2.869.929	14.349.643	3.595.883	25%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	06	9.619.202	48.096.012	15.409.674	32%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	07	5.067.128	25.335.639	10.354.319	41%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	08	8.153.685	40.768.423	13.480.067	33%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	09	44.355.304	221.776.521	82.143.756	37%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	10	18.877.379	94.386.894	32.652.343	35%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	11	11.630.930	58.154.651	17.388.451	30%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	12	12.028.660	60.143.300	18.682.710	31%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	13	2.159.437	10.797.185	2.775.077	26%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	14	76.349.177	381.745.885	137.394.111	36%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	15	3.330.063	16.650.314	4.890.692	29%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	16	36.158.344	180.791.719	33.186.604	18%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	17	22.574.591	112.872.955	33.028.164	29%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	18	4.932.279	24.661.395	7.507.350	30%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	19	719.949.549	2.162.210.447	727.208.284	34%
innerorts	<50km	Lkw 3,5-7,5t	20	0	0	0	50%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	01	1.260.202	6.301.012	2.818.893	45%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	02	0	0	0	50%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	03	0	0	0	50%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	04	34.560.288	172.801.440	72.811.109	42%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	05	1.351.782	6.758.908	2.154.420	32%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	06	1.687.781	8.438.905	3.371.491	40%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	07	2.018.248	10.091.242	5.128.108	51%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	08	784.394	3.921.972	1.600.755	41%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	09	12.097.921	60.489.607	27.961.915	46%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	10	20.143.195	100.715.974	43.625.848	43%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	11	6.953.913	34.769.565	13.100.656	38%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	12	15.213.799	76.068.993	29.729.899	39%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	13	4.126.011	20.630.053	6.734.075	33%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	14	23.947.505	119.737.523	53.877.289	45%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	15	4.115.703	20.578.514	7.619.235	37%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	16	7.803.836	39.019.181	9.285.502	24%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	17	10.369.516	51.847.580	19.143.317	37%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	18	5.305.889	26.529.444	10.140.847	38%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	19	318.824.299	956.480.723	396.187.664	41%
Autobahn	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	20	0	0	0	50%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	01	3.237.790	16.188.950	6.679.046	41%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	02	0	0	0	50%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	03	0	0	0	50%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	04	68.989.660	344.948.300	134.039.166	39%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	05	12.005.708	60.028.542	17.645.703	29%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	06	4.655.020	23.275.101	8.575.410	37%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	07	3.913.115	19.565.575	9.169.224	47%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	08	1.877.349	9.386.746	3.533.157	38%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	09	25.760.654	128.803.269	54.908.610	43%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	10	50.715.443	253.577.217	101.293.872	40%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	11	23.622.839	118.114.197	41.041.508	35%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	12	38.121.107	190.605.534	68.698.727	36%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	13	11.701.321	58.506.604	17.612.050	30%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	14	45.408.232	227.041.162	94.212.275	41%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	15	8.172.284	40.861.422	13.952.057	34%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	16	20.188.317	100.941.586	22.152.605	22%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	17	22.060.597	110.302.987	37.558.081	34%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	18	10.985.315	54.926.575	19.362.258	35%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	19	739.195.579	2.218.140.246	847.307.686	38%
außerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	20	0	0	0	50%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	01	2.072.959	10.364.797	3.861.649	37%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	02	0	0	0	50%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	03	0	0	0	50%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	04	39.521.038	197.605.192	69.341.347	35%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	05	9.689.412	48.447.058	12.860.706	27%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	06	3.055.128	15.275.638	5.082.518	33%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	07	2.206.680	11.033.398	4.669.447	42%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	08	1.169.567	5.847.836	1.987.738	34%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	09	15.243.709	76.218.544	29.342.048	38%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	10	32.226.422	161.132.112	58.126.109	36%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	11	16.475.483	82.377.417	25.849.110	31%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	12	24.179.603	120.898.014	39.350.347	33%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	13	7.749.970	38.749.850	10.533.950	27%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	14	25.288.419	126.442.095	47.381.716	37%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	15	4.668.379	23.341.893	7.197.424	31%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	16	12.957.792	64.788.961	12.840.203	20%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	17	13.048.648	65.243.240	20.061.706	31%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	18	6.411.912	32.059.558	10.205.804	32%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	19	454.542.730	1.364.138.219	470.572.707	34%
innerorts	50-150km	Lkw 3,5-7,5t	20	0	0	0	50%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	01	2.103.110	10.515.549	5.026.160	48%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	02	0	0	0	50%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	03	0	0	0	50%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	04	49.956.858	249.784.290	113.317.214	45%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	05	3.221.351	16.106.757	5.787.445	36%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	06	2.661.546	13.307.730	5.719.927	43%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	07	2.701.566	13.507.832	7.283.886	54%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	08	1.680.799	8.403.994	3.704.651	44%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	09	17.163.873	85.819.363	42.402.429	49%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	10	40.069.753	200.348.767	94.387.706	47%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	11	14.031.242	70.156.210	29.110.083	41%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	12	33.769.538	168.847.690	72.681.577	43%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	13	8.597.307	42.986.536	15.696.000	37%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	14	58.627.670	293.138.349	143.845.057	49%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	15	5.700.242	28.501.209	11.454.218	40%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	16	11.911.614	59.558.069	16.144.426	27%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	17	27.046.200	135.231.002	55.554.260	41%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	18	6.831.915	34.159.577	14.068.690	41%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	19	601.087.604	1.803.283.917	806.278.348	45%
Autobahn	>150km	Lkw 3,5-7,5t	20	0	0	0	50%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	01	1.800.978	9.004.891	3.969.266	44%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	02	0	0	0	50%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	03	0	0	0	50%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	04	33.238.382	166.191.908	69.529.332	42%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	05	9.535.807	47.679.036	15.799.148	33%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	06	2.446.682	12.233.411	4.849.104	40%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	07	1.745.829	8.729.146	4.340.869	50%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	08	1.340.801	6.704.007	2.725.357	41%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	09	12.181.464	60.907.322	27.752.517	46%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	10	33.625.337	168.126.684	73.045.392	43%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	11	15.886.823	79.434.115	30.395.675	38%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	12	28.202.724	141.013.620	55.978.041	40%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	13	8.126.529	40.632.646	13.682.299	34%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	14	37.052.291	185.261.455	83.836.819	45%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	15	3.772.514	18.862.569	6.990.857	37%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	16	10.270.715	51.353.575	12.837.489	25%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	17	19.177.992	95.889.962	36.328.015	38%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	18	4.714.492	23.572.462	8.953.102	38%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	19	469.554.584	1.409.161.202	581.043.949	41%
außerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	20	0	0	0	50%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	01	1.156.708	5.783.539	2.302.192	40%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	02	0	0	0	50%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	03	0	0	0	50%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	04	19.101.053	95.505.263	36.082.922	38%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	05	7.720.406	38.602.032	11.551.345	30%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	06	1.610.862	8.054.311	2.883.093	36%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	07	987.624	4.938.118	2.217.597	45%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	08	837.949	4.189.745	1.538.129	37%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	09	7.231.133	36.155.666	14.877.346	41%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	10	21.434.413	107.172.067	42.048.838	39%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	11	11.115.173	55.575.863	19.204.684	35%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	12	17.945.179	89.725.897	32.165.526	36%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	13	5.399.373	26.996.865	8.209.439	30%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	14	20.700.233	103.501.165	42.297.157	41%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	15	2.161.855	10.809.274	3.617.781	33%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	16	6.613.093	33.065.467	7.464.493	23%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	17	11.379.534	56.897.670	19.466.112	34%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	18	2.760.470	13.802.351	4.734.105	34%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	19	290.982.636	873.407.735	325.223.225	37%
innerorts	>150km	Lkw 3,5-7,5t	20	0	0	0	50%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	01	1.162.709	10.654.500	4.615.305	43%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	02	0	0	0	50%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	03	10.239.105	93.826.166	47.627.413	51%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	04	2.634.341	24.139.818	9.746.518	40%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	05	33.679	308.613	92.861	30%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	06	840.218	7.699.346	2.962.065	38%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	07	572.993	5.250.627	2.576.661	49%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	08	896.725	8.217.147	3.262.463	40%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	09	4.135.348	37.894.317	16.853.474	44%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	10	1.173.844	10.756.534	4.468.187	42%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	11	483.842	4.433.689	1.591.835	36%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	12	690.546	6.327.828	2.360.281	37%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	13	110.741	1.014.772	313.177	31%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	14	5.849.087	53.598.181	23.163.286	43%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	15	351.670	3.222.535	1.136.585	35%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	16	2.463.190	22.571.470	4.975.085	22%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	17	1.289.236	11.813.930	4.150.929	35%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	18	592.047	5.425.234	1.983.097	37%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	19	3.032	27.782	11.219	40%
Autobahn	<50km	Lkw 12-26t	20	0	0	0	50%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	01	8.623.253	79.019.291	31.566.608	40%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	02	0	0	0	50%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	03	54.011.320	494.933.407	231.689.960	47%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	04	15.179.949	139.101.657	51.793.497	37%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	05	863.427	7.912.026	2.195.513	28%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	06	6.689.428	61.298.656	21.747.990	35%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	07	3.206.926	29.386.702	13.299.164	45%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	08	6.195.286	56.770.579	20.786.206	37%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	09	25.418.498	232.922.727	95.533.270	41%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	10	8.531.274	78.176.437	29.947.620	38%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	11	4.744.579	43.477.013	14.395.274	33%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	12	4.994.732	45.769.289	15.743.837	34%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	13	906.573	8.307.392	2.364.357	28%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	14	32.015.041	293.370.230	116.921.285	40%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	15	2.015.704	18.470.930	6.007.869	33%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	16	18.394.225	168.555.708	34.261.907	20%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	17	7.917.404	72.551.235	23.508.404	32%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	18	3.538.364	32.423.841	10.929.928	34%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	19	618.899	5.671.289	2.112.158	37%
außerorts	<50km	Lkw 12-26t	20	0	0	0	50%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	01	12.437.683	113.972.863	41.116.151	36%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	02	0	0	0	50%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	03	66.307.479	607.609.421	256.862.768	42%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	04	19.590.290	179.515.869	60.361.774	34%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	05	1.569.862	14.385.453	3.604.857	25%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	06	9.890.607	90.632.701	29.038.174	32%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	07	4.074.100	37.333.071	15.257.501	41%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	08	8.694.961	79.676.385	26.344.972	33%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	09	33.885.184	310.507.312	115.008.734	37%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	10	12.212.708	111.911.301	38.714.762	35%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	11	7.454.697	68.311.209	20.425.299	30%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	12	7.137.104	65.400.945	20.315.927	31%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	13	1.352.677	12.395.272	3.185.815	26%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	14	40.166.810	368.069.068	132.471.689	36%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	15	2.594.033	23.770.458	6.982.090	29%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	16	26.597.363	243.725.270	44.738.853	18%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	17	10.550.117	96.676.131	28.288.753	29%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	18	4.652.686	42.634.943	12.978.805	30%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	19	1.284.743	11.772.755	3.959.487	34%
innerorts	<50km	Lkw 12-26t	20	0	0	0	50%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	01	5.287.455	48.451.662	21.944.088	45%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	02	0	0	0	50%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	03	0	0	0	50%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	04	19.609.933	179.695.869	76.104.539	42%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	05	347.913	3.188.109	1.022.168	32%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	06	5.996.579	54.949.724	22.224.861	40%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	07	1.409.155	12.912.812	6.591.376	51%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	08	5.890.768	53.980.130	22.497.784	42%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	09	7.083.360	64.908.458	30.145.351	46%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	10	7.448.339	68.252.951	29.698.959	44%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	11	2.514.775	23.044.169	8.727.957	38%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	12	4.625.057	42.381.769	16.645.020	39%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	13	1.414.458	12.961.401	4.256.140	33%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	14	5.718.280	52.399.533	23.674.236	45%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	15	2.570.222	23.552.260	8.772.441	37%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	16	4.062.522	37.226.968	8.937.437	24%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	17	2.002.337	18.348.441	6.807.695	37%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	18	8.115.679	74.368.127	28.654.804	39%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	19	44.330	406.215	171.930	42%
Autobahn	50-150km	Lkw 12-26t	20	0	0	0	50%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	01	23.122.963	211.887.559	88.499.685	42%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	02	0	0	0	50%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	03	0	0	0	50%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	04	66.630.206	610.566.733	238.469.597	39%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	05	5.259.456	48.195.094	14.250.141	30%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	06	28.151.232	257.964.166	96.218.889	37%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	07	4.650.453	42.614.482	20.060.415	47%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	08	23.997.773	219.903.891	84.521.295	38%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	09	25.672.835	235.253.343	100.758.635	43%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	10	31.919.768	292.497.192	117.373.191	40%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	11	14.540.867	133.245.418	46.540.524	35%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	12	19.725.741	180.757.076	65.467.834	36%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	13	6.827.833	62.566.937	18.946.818	30%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	14	18.455.600	169.118.119	70.463.810	42%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	15	8.686.773	79.601.352	27.342.344	34%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	16	17.888.588	163.922.298	36.292.826	22%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	17	7.250.774	66.442.557	22.733.938	34%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	18	28.600.104	262.077.416	93.125.284	36%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	19	5.336.014	48.896.630	19.085.402	39%
außerorts	50-150km	Lkw 12-26t	20	0	0	0	50%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	01	17.254.407	158.110.971	59.636.822	38%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	02	0	0	0	50%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	03	0	0	0	50%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	04	44.486.672	407.654.181	143.783.150	35%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	05	4.947.262	45.334.294	12.104.850	27%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	06	21.533.746	197.324.756	66.465.878	34%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	07	3.056.514	28.008.400	11.906.585	43%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	08	17.424.706	159.671.511	55.421.322	35%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	09	17.706.063	162.249.733	62.754.760	39%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	10	23.639.920	216.624.708	78.500.317	36%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	11	11.819.818	108.311.052	34.163.941	32%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	12	14.582.481	133.626.744	43.706.121	33%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	13	5.270.629	48.297.478	13.207.848	27%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	14	11.979.251	109.772.016	41.303.213	38%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	15	5.783.563	52.997.753	16.439.514	31%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	16	13.382.011	122.626.222	24.517.846	20%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	17	4.998.584	45.804.590	14.153.164	31%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	18	19.456.157	178.286.735	57.210.173	32%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	19	5.730.618	52.512.591	18.509.814	35%
innerorts	50-150km	Lkw 12-26t	20	0	0	0	50%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	01	44.211.551	405.133.105	198.422.626	49%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	02	0	0	0	50%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	03	13.574.844	124.393.258	69.471.179	56%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	04	238.372.834	2.184.332.460	1.015.513.003	46%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	05	4.390.836	40.235.484	14.580.638	36%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	06	50.899.239	466.415.815	205.940.587	44%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	07	16.272.070	149.109.317	82.169.144	55%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	08	47.439.148	434.709.231	197.006.909	45%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	09	85.580.364	784.216.740	396.463.126	51%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	10	93.484.452	856.645.948	408.530.203	48%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	11	31.572.048	289.310.858	121.647.055	42%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	12	58.208.400	533.393.406	231.774.198	43%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	13	17.770.608	162.841.192	60.279.373	37%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	14	72.269.173	662.239.479	326.749.379	49%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	15	30.553.875	279.980.813	115.787.891	41%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	16	50.138.603	459.445.718	129.321.107	28%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	17	25.422.727	232.961.482	96.145.686	41%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	18	77.747.725	712.442.259	302.000.506	42%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	19	359.450	3.293.824	1.513.565	46%
Autobahn	>150km	Lkw 12-26t	20	0	0	0	50%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	01	64.442.241	590.517.286	266.718.717	45%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	02	0	0	0	50%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	03	14.073.188	128.959.838	66.418.601	52%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	04	269.954.085	2.473.727.651	1.060.586.391	43%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	05	22.123.560	202.729.517	67.750.374	33%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	06	79.642.201	729.802.307	297.167.512	41%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	07	17.898.527	164.013.376	83.350.971	51%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	08	64.413.066	590.249.939	246.686.829	42%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	09	103.382.432	947.346.215	441.675.017	47%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	10	133.529.663	1.223.600.741	538.133.407	44%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	11	60.846.007	557.563.153	216.201.323	39%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	12	82.744.663	758.231.757	303.841.318	40%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	13	28.591.263	261.996.400	89.439.053	34%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	14	77.741.678	712.386.848	324.147.752	46%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	15	34.418.524	315.394.576	120.286.395	38%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	16	73.585.237	674.299.244	175.031.129	26%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	17	30.683.678	281.170.266	107.014.466	38%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	18	91.320.555	836.817.058	327.126.661	39%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	19	14.421.131	132.148.211	56.000.169	42%
außerorts	>150km	Lkw 12-26t	20	0	0	0	50%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	01	48.239.220	442.040.696	180.301.502	41%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	02	0	0	0	50%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	03	8.966.677	82.166.259	38.215.978	47%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	04	180.809.712	1.656.852.072	641.496.240	39%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	05	20.876.233	191.299.620	57.733.120	30%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	06	61.113.694	560.016.101	205.926.778	37%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	07	11.801.072	108.139.271	49.628.489	46%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	08	46.918.226	429.935.752	162.266.843	38%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	09	71.526.672	655.435.558	275.956.306	42%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	10	99.205.815	909.073.732	361.048.500	40%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	11	49.616.447	454.660.938	159.209.192	35%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	12	61.363.647	562.306.546	203.485.850	36%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	13	22.140.427	202.884.080	62.545.498	31%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	14	50.620.741	463.863.801	190.604.793	41%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	15	22.988.061	210.651.389	72.550.904	34%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	16	55.221.614	506.023.955	118.617.813	23%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	17	21.219.892	194.448.747	66.833.539	34%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	18	62.320.520	571.074.869	201.601.927	35%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	19	15.536.633	142.370.135	54.483.270	38%
innerorts	>150km	Lkw 12-26t	20	0	0	0	50%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	01	34.420.877	780.430.370	338.066.024	43%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	02	462.431	10.484.766	5.159.777	49%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	03	328.073.885	7.438.474.710	3.775.869.002	51%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	04	69.877.160	1.584.336.678	639.680.324	40%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	05	747.314	16.943.984	5.098.429	30%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	06	24.800.973	562.316.648	216.332.460	38%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	07	15.582.406	353.302.531	173.377.530	49%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	08	26.736.255	606.195.626	240.678.497	40%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	09	110.148.959	2.497.425.991	1.110.728.681	44%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	10	28.886.525	654.949.074	272.061.164	42%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	11	11.846.529	268.598.355	96.435.328	36%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	12	16.167.354	366.565.158	136.728.854	37%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	13	2.677.069	60.697.644	18.732.368	31%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	14	126.149.205	2.860.202.281	1.236.080.827	43%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	15	9.443.121	214.105.474	75.514.794	35%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	16	64.544.421	1.463.426.571	322.560.802	22%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
Autobahn	<50km	Lkw >26t	17	25.167.013	570.615.943	200.490.968	35%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	18	17.031.801	386.164.901	141.155.630	37%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	19	90.875	2.060.435	832.101	40%
Autobahn	<50km	Lkw >26t	20	0	0	0	50%
außerorts	<50km	Lkw >26t	01	62.744.058	1.422.606.635	568.302.560	40%
außerorts	<50km	Lkw >26t	02	1.345.680	30.510.840	13.846.938	45%
außerorts	<50km	Lkw >26t	03	425.348.675	9.644.002.484	4.514.584.216	47%
außerorts	<50km	Lkw >26t	04	98.965.581	2.243.863.360	835.486.314	37%
außerorts	<50km	Lkw >26t	05	4.708.980	106.767.501	29.626.979	28%
außerorts	<50km	Lkw >26t	06	48.530.690	1.100.344.537	390.388.357	35%
außerorts	<50km	Lkw >26t	07	21.435.064	486.000.841	219.943.181	45%
außerorts	<50km	Lkw >26t	08	45.399.748	1.029.356.172	376.892.576	37%
außerorts	<50km	Lkw >26t	09	166.405.931	3.772.949.820	1.547.475.584	41%
außerorts	<50km	Lkw >26t	10	51.599.971	1.169.934.870	448.175.511	38%
außerorts	<50km	Lkw >26t	11	28.551.980	647.363.884	214.342.699	33%
außerorts	<50km	Lkw >26t	12	28.741.476	651.660.349	224.159.788	34%
außerorts	<50km	Lkw >26t	13	5.386.497	122.128.964	34.758.973	28%
außerorts	<50km	Lkw >26t	14	169.707.537	3.847.807.707	1.533.525.137	40%
außerorts	<50km	Lkw >26t	15	13.303.235	301.626.509	98.107.271	33%
außerorts	<50km	Lkw >26t	16	118.465.791	2.685.994.918	545.975.630	20%
außerorts	<50km	Lkw >26t	17	37.986.802	861.281.186	279.076.513	32%
außerorts	<50km	Lkw >26t	18	25.018.266	567.243.381	191.215.133	34%
außerorts	<50km	Lkw >26t	19	4.559.563	103.379.745	38.501.717	37%
außerorts	<50km	Lkw >26t	20	0	0	0	50%
innerorts	<50km	Lkw >26t	01	48.230.088	1.093.528.944	394.494.796	36%
innerorts	<50km	Lkw >26t	02	1.176.081	26.665.487	10.928.620	41%
innerorts	<50km	Lkw >26t	03	278.291.497	6.309.750.208	2.667.404.167	42%
innerorts	<50km	Lkw >26t	04	68.066.253	1.543.277.672	518.923.358	34%
innerorts	<50km	Lkw >26t	05	4.562.888	103.455.126	25.924.866	25%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
innerorts	<50km	Lkw >26t	06	38.240.852	867.041.306	277.794.835	32%
innerorts	<50km	Lkw >26t	07	14.512.585	329.046.296	134.476.594	41%
innerorts	<50km	Lkw >26t	08	33.957.591	769.926.199	254.575.861	33%
innerorts	<50km	Lkw >26t	09	118.224.065	2.680.514.235	992.835.066	37%
innerorts	<50km	Lkw >26t	10	39.366.305	892.558.885	308.773.149	35%
innerorts	<50km	Lkw >26t	11	23.908.131	542.073.104	162.081.819	30%
innerorts	<50km	Lkw >26t	12	21.887.495	496.258.868	154.156.167	31%
innerorts	<50km	Lkw >26t	13	4.283.265	97.115.183	24.960.404	26%
innerorts	<50km	Lkw >26t	14	113.472.738	2.572.786.591	925.971.278	36%
innerorts	<50km	Lkw >26t	15	9.123.956	206.869.007	60.763.577	29%
innerorts	<50km	Lkw >26t	16	91.290.834	2.069.852.533	379.947.587	18%
innerorts	<50km	Lkw >26t	17	26.976.419	611.640.919	178.974.465	29%
innerorts	<50km	Lkw >26t	18	17.532.165	397.509.741	121.008.761	30%
innerorts	<50km	Lkw >26t	19	5.044.251	114.369.147	38.465.354	34%
innerorts	<50km	Lkw >26t	20	0	0	0	50%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	01	310.935.286	7.049.888.363	3.180.416.592	45%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	02	3.087.302	69.998.931	35.703.850	51%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	03	199.234.737	4.517.282.915	2.373.322.524	53%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	04	1.032.470.444	23.409.377.081	9.872.481.067	42%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	05	15.334.370	347.678.767	110.848.175	32%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	06	351.591.779	7.971.699.890	3.210.043.700	40%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	07	76.071.684	1.724.786.165	877.349.736	51%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	08	348.916.516	7.911.043.204	3.283.089.408	42%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	09	374.499.486	8.491.090.214	3.928.403.826	46%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	10	363.817.920	8.248.905.264	3.574.593.821	43%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	11	122.217.503	2.771.058.135	1.044.581.972	38%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	12	214.983.945	4.874.367.360	1.905.620.063	39%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	13	67.875.057	1.538.942.661	502.585.755	33%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	14	245.048.034	5.556.015.543	2.500.276.317	45%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	15	136.995.453	3.106.121.080	1.151.379.970	37%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	16	211.291.695	4.790.652.345	1.141.618.724	24%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	17	77.793.569	1.763.826.746	651.243.695	37%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	18	463.634.049	10.512.053.245	4.031.660.288	38%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	19	2.749.677	62.343.897	26.295.356	42%
Autobahn	50-150km	Lkw >26t	20	0	0	0	50%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	01	334.208.442	7.577.564.555	3.152.527.131	42%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	02	5.297.504	120.111.214	56.498.200	47%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	03	152.312.386	3.453.404.496	1.673.224.971	48%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	04	862.230.329	19.549.494.137	7.603.252.153	39%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	05	56.975.248	1.291.809.435	379.818.618	29%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	06	405.679.627	9.198.042.819	3.415.724.608	37%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	07	61.703.534	1.399.014.668	656.276.987	47%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	08	349.358.358	7.921.061.169	3.031.515.116	38%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	09	333.607.929	7.563.949.024	3.227.220.807	43%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	10	383.208.361	8.688.548.005	3.472.202.191	40%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	11	173.690.179	3.938.106.815	1.369.026.321	35%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	12	225.357.947	5.109.578.871	1.842.173.727	36%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	13	80.529.274	1.825.853.851	549.896.765	30%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	14	194.385.815	4.407.342.484	1.829.063.454	42%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	15	113.800.619	2.580.220.693	882.032.444	34%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	16	228.672.223	5.184.724.000	1.139.408.585	22%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	17	69.237.518	1.569.833.956	534.525.888	34%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	18	401.576.877	9.105.020.477	3.220.362.221	35%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	19	81.349.536	1.844.451.804	717.430.513	39%
außerorts	50-150km	Lkw >26t	20	0	0	0	50%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	01	132.907.989	3.013.445.330	1.132.162.376	38%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	02	2.395.272	54.308.415	23.069.299	42%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	03	51.555.891	1.168.935.430	511.462.295	44%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
innerorts	50-150km	Lkw >26t	04	306.802.702	6.956.189.575	2.443.157.653	35%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	05	28.561.919	647.589.215	171.946.610	27%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	06	165.379.819	3.749.684.628	1.257.472.156	34%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	07	21.613.159	490.038.805	207.592.469	42%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	08	135.189.444	3.065.173.140	1.059.369.818	35%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	09	122.620.102	2.780.186.315	1.071.199.108	39%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	10	151.251.046	3.429.340.560	1.237.612.341	36%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	11	75.244.173	1.706.023.870	535.581.569	31%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	12	88.786.734	2.013.076.644	655.423.487	33%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	13	33.129.163	751.143.117	204.293.269	27%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	14	67.242.398	1.524.598.269	571.378.124	37%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	15	40.379.298	915.526.658	282.627.824	31%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	16	91.166.619	2.067.036.189	410.221.236	20%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	17	25.437.901	576.757.843	177.347.368	31%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	18	145.591.243	3.301.014.899	1.054.356.535	32%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	19	46.560.402	1.055.671.880	370.815.346	35%
innerorts	50-150km	Lkw >26t	20	0	0	0	50%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	01	808.069.241	18.321.490.635	9.066.318.434	49%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	02	8.380.098	190.003.390	105.131.507	55%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	03	523.473.674	11.868.807.187	6.748.092.400	57%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	04	2.638.813.052	59.830.254.850	27.852.906.935	47%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	05	37.966.167	860.813.333	312.061.278	36%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	06	913.344.533	20.708.415.138	9.244.788.055	45%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	07	195.197.932	4.425.755.744	2.444.642.263	55%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	08	907.696.781	20.580.362.713	9.441.474.287	46%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	09	957.794.977	21.716.247.582	10.994.039.758	51%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	10	918.210.661	20.818.745.678	9.932.195.350	48%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	11	308.181.214	6.987.444.817	2.939.293.817	42%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	12	537.740.300	12.192.276.815	5.299.846.153	43%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
Autobahn	>150km	Lkw >26t	13	170.766.350	3.871.814.345	1.433.922.130	37%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	14	603.282.180	13.678.318.957	6.750.577.802	49%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	15	350.823.401	7.954.278.341	3.296.938.713	41%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	16	538.955.524	12.219.829.798	3.444.499.686	28%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	17	187.474.283	4.250.636.139	1.754.622.723	41%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	18	1.199.898.340	27.205.498.087	11.626.414.455	43%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	19	7.158.604	162.308.247	75.545.813	47%
Autobahn	>150km	Lkw >26t	20	0	0	0	50%
außerorts	>150km	Lkw >26t	01	289.490.343	6.563.663.530	2.995.324.584	46%
außerorts	>150km	Lkw >26t	02	4.792.690	108.665.478	55.448.596	51%
außerorts	>150km	Lkw >26t	03	133.383.806	3.024.233.596	1.585.684.193	52%
außerorts	>150km	Lkw >26t	04	734.500.998	16.653.465.412	7.149.599.459	43%
außerorts	>150km	Lkw >26t	05	47.017.024	1.066.024.948	356.390.143	33%
außerorts	>150km	Lkw >26t	06	351.250.717	7.963.966.950	3.278.739.878	41%
außerorts	>150km	Lkw >26t	07	52.771.607	1.196.499.577	609.491.763	51%
außerorts	>150km	Lkw >26t	08	302.920.389	6.868.165.241	2.905.727.896	42%
außerorts	>150km	Lkw >26t	09	284.377.868	6.447.747.511	3.010.287.386	47%
außerorts	>150km	Lkw >26t	10	322.352.706	7.308.757.439	3.215.597.329	44%
außerorts	>150km	Lkw >26t	11	145.977.565	3.309.774.041	1.283.956.685	39%
außerorts	>150km	Lkw >26t	12	187.878.695	4.259.805.447	1.707.637.291	40%
außerorts	>150km	Lkw >26t	13	67.528.013	1.531.074.056	522.919.284	34%
außerorts	>150km	Lkw >26t	14	159.504.135	3.616.464.233	1.645.962.029	46%
außerorts	>150km	Lkw >26t	15	97.132.625	2.202.304.452	841.811.519	38%
außerorts	>150km	Lkw >26t	16	194.411.528	4.407.925.480	1.145.836.504	26%
außerorts	>150km	Lkw >26t	17	55.613.163	1.260.926.655	480.006.437	38%
außerorts	>150km	Lkw >26t	18	346.398.440	7.853.950.438	3.095.313.862	39%
außerorts	>150km	Lkw >26t	19	70.589.454	1.600.486.638	686.988.207	43%
außerorts	>150km	Lkw >26t	20	0	0	0	50%
innerorts	>150km	Lkw >26t	01	115.489.059	2.618.502.972	1.079.112.854	41%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
innerorts	>150km	Lkw >26t	02	2.173.882	49.288.802	22.712.421	46%
innerorts	>150km	Lkw >26t	03	45.291.767	1.026.907.900	486.238.197	47%
innerorts	>150km	Lkw >26t	04	262.181.090	5.944.476.215	2.304.660.189	39%
innerorts	>150km	Lkw >26t	05	23.644.459	536.094.822	161.851.281	30%
innerorts	>150km	Lkw >26t	06	143.644.706	3.256.880.723	1.210.864.595	37%
innerorts	>150km	Lkw >26t	07	18.543.069	420.430.141	193.403.954	46%
innerorts	>150km	Lkw >26t	08	117.590.771	2.666.155.458	1.018.628.656	38%
innerorts	>150km	Lkw >26t	09	104.856.218	2.377.422.780	1.002.357.327	42%
innerorts	>150km	Lkw >26t	10	127.634.423	2.893.876.874	1.149.779.002	40%
innerorts	>150km	Lkw >26t	11	63.439.071	1.438.364.801	503.891.796	35%
innerorts	>150km	Lkw >26t	12	74.255.021	1.683.596.664	609.480.950	36%
innerorts	>150km	Lkw >26t	13	27.868.509	631.867.425	194.885.999	31%
innerorts	>150km	Lkw >26t	14	55.350.769	1.254.977.345	515.807.601	41%
innerorts	>150km	Lkw >26t	15	34.574.217	783.907.080	270.594.090	35%
innerorts	>150km	Lkw >26t	16	77.753.069	1.762.908.496	413.841.838	23%
innerorts	>150km	Lkw >26t	17	20.497.008	464.732.136	159.762.981	34%
innerorts	>150km	Lkw >26t	18	125.984.052	2.856.457.740	1.016.624.456	36%
innerorts	>150km	Lkw >26t	19	40.529.809	918.939.213	356.205.177	39%
innerorts	>150km	Lkw >26t	20	0	0	0	50%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	01	8.092.804	40.464.019	23.958.084	59%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	02	0	0	0	50%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	03	3.591.131	17.955.654	12.076.408	67%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	04	31.610.737	158.053.686	91.077.760	58%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	05	40.529.932	202.649.658	92.574.448	46%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	06	9.520.706	47.603.532	25.427.046	53%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	07	1.951.860	9.759.302	6.621.361	68%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	08	4.765.964	23.829.818	12.962.433	54%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	09	24.903.033	124.515.163	76.694.241	62%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	10	63.139.394	315.696.968	189.680.692	60%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	11	47.443.167	237.215.837	124.615.229	53%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	12	49.352.846	246.764.230	135.343.199	55%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	13	17.538.158	87.690.792	40.676.721	46%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	14	26.165.983	130.829.913	80.038.092	61%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	15	3.590.083	17.950.413	9.101.442	51%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	16	34.463.466	172.317.329	55.273.227	32%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	17	23.235.015	116.175.077	59.681.370	51%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	18	6.003.325	30.016.627	15.623.037	52%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	19	839.027.590	2.521.745.633	1.412.069.202	56%
Autobahn	internat.	Lkw 3,5-7,5t	20	0	0	0	50%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	01	8.229.046	41.145.229	25.576.273	62%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	02	0	0	0	50%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	03	4.998.843	24.994.216	18.004.417	72%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	04	19.987.684	99.938.420	59.922.765	60%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	05	19.771.188	98.855.942	46.448.581	47%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	06	8.487.145	42.435.726	23.625.218	56%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	07	1.671.430	8.357.149	5.934.886	71%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	08	4.812.746	24.063.728	13.709.479	57%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	09	22.305.492	111.527.458	71.751.118	64%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	10	35.622.944	178.114.719	110.950.401	62%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	11	27.552.263	137.761.316	74.575.712	54%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	12	26.239.658	131.198.288	74.331.115	57%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	13	8.843.084	44.215.421	21.147.284	48%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	14	20.534.791	102.673.957	64.800.818	63%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	15	2.334.043	11.670.214	6.135.552	53%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	16	30.032.356	150.161.778	48.955.536	33%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	17	15.298.858	76.494.290	40.119.526	52%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	18	4.040.692	20.203.461	10.937.251	54%
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	19	554.510.159	1.667.811.327	972.212.927	58%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
außerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	20	0	0	0	50%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	01	3.173.013	15.865.067	10.185.947	64%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	02	0	0	0	50%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	03	2.125.586	10.627.931	7.945.078	75%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	04	5.762.382	28.811.910	17.740.765	62%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	05	4.989.825	24.949.126	12.025.416	48%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	06	3.084.954	15.424.770	8.843.988	57%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	07	587.701	2.938.505	2.149.991	73%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	08	1.869.480	9.347.401	5.500.199	59%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	09	8.065.196	40.325.979	26.724.512	66%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	10	9.917.837	49.589.185	31.698.995	64%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	11	7.886.370	39.431.849	21.853.268	55%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	12	7.088.469	35.442.346	20.587.082	58%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	13	2.230.707	11.153.537	5.477.272	49%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	14	7.265.292	36.326.458	23.539.589	65%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	15	683.521	3.417.606	1.842.540	54%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	16	10.771.233	53.856.166	17.936.554	33%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	17	4.969.164	24.845.821	13.309.313	54%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	18	1.202.095	6.010.476	3.340.159	56%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	19	174.057.074	523.757.131	314.686.689	60%
innerorts	internat.	Lkw 3,5-7,5t	20	0	0	0	50%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	01	51.418.443	471.173.546	301.702.947	64%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	02	0	0	0	50%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	03	4.299.368	39.397.316	27.503.391	70%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	04	83.751.797	767.460.643	468.264.520	61%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	05	40.306.609	369.350.116	175.405.528	47%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	06	71.013.178	650.730.150	375.903.074	58%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	07	4.740.607	43.440.613	31.315.282	72%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	08	43.253.067	396.350.019	234.915.800	59%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	09	48.123.925	440.984.195	290.572.559	66%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	10	96.035.522	880.022.717	550.785.136	63%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	11	68.773.392	630.205.844	347.064.820	55%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	12	58.796.091	538.778.719	307.023.336	57%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	13	25.263.384	231.501.337	112.375.729	49%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	14	18.183.942	166.628.783	106.457.490	64%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	15	10.343.187	94.779.924	51.370.626	54%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	16	60.093.841	550.670.670	199.302.112	36%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	17	14.242.975	130.515.676	69.908.292	54%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	18	35.245.837	322.975.668	179.491.147	56%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	19	36.128.597	331.064.855	199.455.336	60%
Autobahn	internat.	Lkw 12-26t	20	0	0	0	50%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	01	33.565.247	307.575.563	205.917.675	67%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	02	0	0	0	50%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	03	7.085.735	64.930.220	47.273.770	73%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	04	48.261.937	442.248.865	283.660.197	64%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	05	22.650.546	207.558.567	103.364.200	50%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	06	44.026.200	403.434.641	244.031.731	60%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	07	3.130.068	28.682.420	21.589.560	75%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	08	27.337.276	250.505.470	155.415.983	62%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	09	33.633.071	308.197.072	210.629.590	68%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	10	55.664.842	510.085.481	335.469.942	66%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	11	40.527.271	371.372.158	213.964.206	58%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	12	33.926.914	310.889.707	185.894.347	60%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	13	14.073.244	128.960.350	65.752.759	51%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	14	14.387.262	131.837.861	86.634.420	66%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	15	5.991.121	54.899.716	31.195.931	57%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	16	42.085.226	385.648.500	140.794.660	37%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	17	10.024.664	91.861.132	50.589.783	55%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	18	20.460.176	187.487.081	109.544.417	58%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	19	22.967.696	210.464.769	133.442.960	63%
außerorts	internat.	Lkw 12-26t	20	0	0	0	50%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	01	10.038.034	91.983.647	63.175.764	69%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	02	0	0	0	50%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	03	3.330.814	30.521.960	22.951.096	75%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	04	13.433.397	123.097.099	81.272.917	66%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	05	6.168.920	56.528.980	28.982.828	51%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	06	12.563.052	115.121.682	71.570.241	62%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	07	980.867	8.988.190	6.926.922	77%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	08	7.887.502	72.277.227	46.070.689	64%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	09	11.050.291	101.259.479	70.624.256	70%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	10	15.646.938	143.380.915	96.997.168	68%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	11	11.580.907	106.121.787	62.717.325	59%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	12	9.496.245	87.018.962	53.494.964	61%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	13	3.794.470	34.770.677	18.278.387	53%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	14	5.138.794	47.089.399	31.513.050	67%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	15	1.671.843	15.319.953	8.949.782	58%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	16	13.871.265	127.109.508	46.643.067	37%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	17	3.323.121	30.451.456	17.034.643	56%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	18	5.552.747	50.882.663	30.671.155	60%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	19	6.251.784	57.288.298	37.494.927	65%
innerorts	internat.	Lkw 12-26t	20	0	0	0	50%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	01	1.179.873.650	26.751.474.905	16.999.117.151	64%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	02	34.696.533	786.680.365	560.432.206	71%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	03	172.285.903	3.906.267.425	2.754.997.871	71%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	04	1.214.207.013	27.529.921.064	16.459.819.864	60%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	05	460.070.004	10.431.245.059	4.816.586.472	46%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	06	1.594.888.956	36.161.187.175	20.709.662.302	57%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
Autobahn	internat.	Lkw >26t	07	76.428.845	1.732.884.126	1.227.520.235	71%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	08	1.028.707.623	23.324.062.015	13.734.108.413	59%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	09	744.074.512	16.870.527.311	10.874.607.320	64%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	10	1.248.016.333	28.296.485.501	17.334.956.501	61%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	11	892.776.867	20.242.080.964	10.874.663.530	54%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	12	720.040.364	16.325.597.022	9.084.971.638	56%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	13	317.922.595	7.208.312.796	3.407.004.110	47%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	14	225.046.135	5.102.509.098	3.170.991.942	62%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	15	155.152.938	3.517.808.815	1.865.253.808	53%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	16	898.594.666	20.373.988.924	7.068.749.111	35%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	17	150.768.277	3.418.394.665	1.774.085.110	52%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	18	687.747.533	15.593.416.194	8.554.772.434	55%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	19	889.707.186	20.172.481.587	12.090.608.821	60%
Autobahn	internat.	Lkw >26t	20	0	0	0	50%
außerorts	internat.	Lkw >26t	01	239.982.655	5.441.167.336	3.587.069.717	66%
außerorts	internat.	Lkw >26t	02	7.245.372	164.275.546	121.678.737	74%
außerorts	internat.	Lkw >26t	03	65.226.222	1.478.885.174	1.084.096.249	73%
außerorts	internat.	Lkw >26t	04	236.601.271	5.364.500.647	3.329.419.405	62%
außerorts	internat.	Lkw >26t	05	88.425.803	2.004.893.189	953.686.382	48%
außerorts	internat.	Lkw >26t	06	310.372.068	7.037.118.424	4.177.241.332	59%
außerorts	internat.	Lkw >26t	07	17.078.441	387.222.377	284.530.309	73%
außerorts	internat.	Lkw >26t	08	201.509.753	4.568.864.724	2.789.829.820	61%
außerorts	internat.	Lkw >26t	09	178.778.543	4.053.476.145	2.696.056.694	67%
außerorts	internat.	Lkw >26t	10	247.390.548	5.609.127.749	3.566.957.265	64%
außerorts	internat.	Lkw >26t	11	180.518.569	4.092.928.050	2.269.578.464	55%
außerorts	internat.	Lkw >26t	12	142.413.812	3.228.972.458	1.859.745.202	58%
außerorts	internat.	Lkw >26t	13	60.134.749	1.363.445.337	665.124.850	49%
außerorts	internat.	Lkw >26t	14	62.723.321	1.422.136.469	909.178.134	64%
außerorts	internat.	Lkw >26t	15	30.260.392	686.098.985	376.067.132	55%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
außerorts	internat.	Lkw >26t	16	217.886.145	4.940.169.423	1.710.434.104	35%
außerorts	internat.	Lkw >26t	17	37.706.880	854.934.472	453.493.002	53%
außerorts	internat.	Lkw >26t	18	128.642.810	2.916.740.198	1.660.722.823	57%
außerorts	internat.	Lkw >26t	19	176.156.120	3.994.017.520	2.492.292.448	62%
außerorts	internat.	Lkw >26t	20	0	0	0	50%
innerorts	internat.	Lkw >26t	01	38.320.585	868.849.103	588.720.248	68%
innerorts	internat.	Lkw >26t	02	1.198.751	27.179.478	20.687.034	76%
innerorts	internat.	Lkw >26t	03	15.267.743	346.168.131	261.454.505	76%
innerorts	internat.	Lkw >26t	04	35.952.301	815.152.614	521.056.250	64%
innerorts	internat.	Lkw >26t	05	13.108.580	297.213.060	145.578.390	49%
innerorts	internat.	Lkw >26t	06	47.304.274	1.072.537.806	655.344.247	61%
innerorts	internat.	Lkw >26t	07	2.965.827	67.244.692	50.712.241	75%
innerorts	internat.	Lkw >26t	08	30.945.600	701.634.831	440.906.142	63%
innerorts	internat.	Lkw >26t	09	32.865.274	745.159.928	507.651.700	68%
innerorts	internat.	Lkw >26t	10	38.171.895	865.477.845	566.487.767	65%
innerorts	internat.	Lkw >26t	11	28.437.669	644.772.077	367.112.485	57%
innerorts	internat.	Lkw >26t	12	21.868.312	495.823.949	293.771.820	59%
innerorts	internat.	Lkw >26t	13	8.789.773	199.292.005	100.244.497	50%
innerorts	internat.	Lkw >26t	14	12.657.417	286.983.753	187.912.960	65%
innerorts	internat.	Lkw >26t	15	4.605.228	104.415.110	58.879.231	56%
innerorts	internat.	Lkw >26t	16	40.308.200	913.914.630	320.147.024	35%
innerorts	internat.	Lkw >26t	17	7.070.172	160.303.215	86.817.322	54%
innerorts	internat.	Lkw >26t	18	18.713.638	424.297.491	249.410.869	59%
innerorts	internat.	Lkw >26t	19	25.478.839	577.686.020	372.483.879	64%
innerorts	internat.	Lkw >26t	20	0	0	0	50%
Autobahn	<50km	LNF	01	26.552.547	23.897.292	10.421.473	44%
Autobahn	<50km	LNF	02	0	0	0	44%
Autobahn	<50km	LNF	03	0	0	0	44%
Autobahn	<50km	LNF	04	225.585.102	203.026.592	88.538.743	44%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
Autobahn	<50km	LNF	05	36.173.520	32.556.168	14.197.560	44%
Autobahn	<50km	LNF	06	26.137.283	23.523.555	10.258.488	44%
Autobahn	<50km	LNF	07	0	0	0	44%
Autobahn	<50km	LNF	08	18.165.878	16.349.291	7.129.833	44%
Autobahn	<50km	LNF	09	137.308.486	123.577.638	53.891.505	44%
Autobahn	<50km	LNF	10	176.588.416	158.929.575	69.308.284	44%
Autobahn	<50km	LNF	11	82.168.524	73.951.671	32.249.904	44%
Autobahn	<50km	LNF	12	135.833.747	122.250.373	53.312.693	44%
Autobahn	<50km	LNF	13	37.326.447	33.593.802	14.650.066	44%
Autobahn	<50km	LNF	14	284.529.943	256.076.949	111.673.702	44%
Autobahn	<50km	LNF	15	26.805.004	24.124.504	10.520.559	44%
Autobahn	<50km	LNF	16	105.994.490	95.395.041	41.601.235	44%
Autobahn	<50km	LNF	17	112.863.897	101.577.507	44.297.373	44%
Autobahn	<50km	LNF	18	35.577.259	32.019.533	13.963.536	44%
Autobahn	<50km	LNF	19	3.288.358.600	2.959.522.740	1.290.631.041	44%
Autobahn	<50km	LNF	20	0	0	0	44%
außerorts	<50km	LNF	01	65.736.078	59.162.470	25.800.417	44%
außerorts	<50km	LNF	02	0	0	0	44%
außerorts	<50km	LNF	03	0	0	0	44%
außerorts	<50km	LNF	04	558.480.505	502.632.454	219.195.156	44%
außerorts	<50km	LNF	05	89.554.698	80.599.229	35.148.865	44%
außerorts	<50km	LNF	06	64.708.010	58.237.209	25.396.916	44%
außerorts	<50km	LNF	07	0	0	0	44%
außerorts	<50km	LNF	08	44.973.222	40.475.900	17.651.310	44%
außerorts	<50km	LNF	09	339.934.295	305.940.865	133.419.072	44%
außerorts	<50km	LNF	10	437.179.524	393.461.572	171.586.355	44%
außerorts	<50km	LNF	11	203.424.420	183.081.978	79.841.010	44%
außerorts	<50km	LNF	12	336.283.287	302.654.959	131.986.107	44%
außerorts	<50km	LNF	13	92.408.996	83.168.096	36.269.134	44%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
außerorts	<50km	LNF	14	704.410.108	633.969.097	276.470.319	44%
außerorts	<50km	LNF	15	66.361.085	59.724.977	26.045.723	44%
außerorts	<50km	LNF	16	262.410.307	236.169.276	102.992.079	44%
außerorts	<50km	LNF	17	279.416.882	251.475.194	109.666.902	44%
außerorts	<50km	LNF	18	88.078.537	79.270.683	34.569.494	44%
außerorts	<50km	LNF	19	8.140.981.608	7.326.883.447	3.195.212.216	44%
außerorts	<50km	LNF	20	0	0	0	44%
innerorts	<50km	LNF	01	69.404.902	62.464.412	27.240.375	44%
innerorts	<50km	LNF	02	0	0	0	44%
innerorts	<50km	LNF	03	0	0	0	44%
innerorts	<50km	LNF	04	589.650.099	530.685.089	231.428.750	44%
innerorts	<50km	LNF	05	94.552.874	85.097.587	37.110.574	44%
innerorts	<50km	LNF	06	68.319.456	61.487.511	26.814.354	44%
innerorts	<50km	LNF	07	0	0	0	44%
innerorts	<50km	LNF	08	47.483.242	42.734.918	18.636.455	44%
innerorts	<50km	LNF	09	358.906.513	323.015.862	140.865.381	44%
innerorts	<50km	LNF	10	461.579.138	415.421.224	181.162.834	44%
innerorts	<50km	LNF	11	214.777.828	193.300.045	84.297.051	44%
innerorts	<50km	LNF	12	355.051.738	319.546.564	139.352.440	44%
innerorts	<50km	LNF	13	97.566.474	87.809.826	38.293.366	44%
innerorts	<50km	LNF	14	743.724.242	669.351.818	291.900.522	44%
innerorts	<50km	LNF	15	1.764.915.252	1.588.423.727	692.702.557	44%
innerorts	<50km	LNF	16	277.055.801	249.350.221	108.740.214	44%
innerorts	<50km	LNF	17	295.011.537	265.510.383	115.787.569	44%
innerorts	<50km	LNF	18	92.994.326	83.694.893	36.498.867	44%
innerorts	<50km	LNF	19	8.595.341.415	7.735.807.274	3.373.541.572	44%
innerorts	<50km	LNF	20	0	0	0	44%
Autobahn	50-150km	LNF	01	29.451.005	26.505.905	11.559.074	44%
Autobahn	50-150km	LNF	02	0	0	0	44%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
Autobahn	50-150km	LNF	03	0	0	0	44%
Autobahn	50-150km	LNF	04	250.209.821	225.188.839	98.203.572	44%
Autobahn	50-150km	LNF	05	40.122.197	36.109.978	15.747.356	44%
Autobahn	50-150km	LNF	06	28.990.411	26.091.370	11.378.298	44%
Autobahn	50-150km	LNF	07	0	0	0	44%
Autobahn	50-150km	LNF	08	20.148.853	18.133.968	7.908.120	44%
Autobahn	50-150km	LNF	09	152.296.988	137.067.290	59.774.266	44%
Autobahn	50-150km	LNF	10	195.864.689	176.278.220	76.873.930	44%
Autobahn	50-150km	LNF	11	91.137.985	82.024.186	35.770.281	44%
Autobahn	50-150km	LNF	12	150.661.268	135.595.141	59.132.270	44%
Autobahn	50-150km	LNF	13	41.400.977	37.260.879	16.249.257	44%
Autobahn	50-150km	LNF	14	315.589.041	284.030.137	123.863.928	44%
Autobahn	50-150km	LNF	15	29.731.020	26.757.918	11.668.976	44%
Autobahn	50-150km	LNF	16	117.564.777	105.808.299	46.142.398	44%
Autobahn	50-150km	LNF	17	125.184.044	112.665.639	49.132.845	44%
Autobahn	50-150km	LNF	18	39.460.849	35.514.764	15.487.787	44%
Autobahn	50-150km	LNF	19	3.647.313.615	3.282.582.254	1.431.515.459	44%
Autobahn	50-150km	LNF	20	0	0	0	44%
außerorts	50-150km	LNF	01	43.707.942	39.337.147	17.154.706	44%
außerorts	50-150km	LNF	02	0	0	0	44%
außerorts	50-150km	LNF	03	0	0	0	44%
außerorts	50-150km	LNF	04	371.333.886	334.200.497	145.742.937	44%
außerorts	50-150km	LNF	05	59.544.951	53.590.456	23.370.493	44%
außerorts	50-150km	LNF	06	43.024.379	38.721.941	16.886.418	44%
außerorts	50-150km	LNF	07	0	0	0	44%
außerorts	50-150km	LNF	08	29.902.711	26.912.440	11.736.362	44%
außerorts	50-150km	LNF	09	226.022.433	203.420.190	88.710.388	44%
außerorts	50-150km	LNF	10	290.680.821	261.612.739	114.087.828	44%
außerorts	50-150km	LNF	11	135.256.969	121.731.272	53.086.316	44%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
außerorts	50-150km	LNF	12	223.594.877	201.235.389	87.757.609	44%
außerorts	50-150km	LNF	13	61.442.774	55.298.497	24.115.360	44%
außerorts	50-150km	LNF	14	468.362.531	421.526.278	183.825.213	44%
außerorts	50-150km	LNF	15	44.123.509	39.711.158	17.317.810	44%
außerorts	50-150km	LNF	16	174.476.706	157.029.036	68.479.470	44%
außerorts	50-150km	LNF	17	185.784.384	167.205.946	72.917.562	44%
außerorts	50-150km	LNF	18	58.563.450	52.707.105	22.985.269	44%
außerorts	50-150km	LNF	19	5.412.941.562	4.871.647.405	2.124.497.737	44%
außerorts	50-150km	LNF	20	0	0	0	44%
innerorts	50-150km	LNF	01	21.977.552	19.779.797	8.625.857	44%
innerorts	50-150km	LNF	02	0	0	0	44%
innerorts	50-150km	LNF	03	0	0	0	44%
innerorts	50-150km	LNF	04	186.716.866	168.045.179	73.283.547	44%
innerorts	50-150km	LNF	05	29.940.835	26.946.751	11.751.325	44%
innerorts	50-150km	LNF	06	21.633.838	19.470.454	8.490.954	44%
innerorts	50-150km	LNF	07	0	0	0	44%
innerorts	50-150km	LNF	08	15.035.904	13.532.313	5.901.365	44%
innerorts	50-150km	LNF	09	113.650.281	102.285.252	44.606.017	44%
innerorts	50-150km	LNF	10	146.162.292	131.546.063	57.366.490	44%
innerorts	50-150km	LNF	11	68.010.915	61.209.823	26.693.256	44%
innerorts	50-150km	LNF	12	112.429.639	101.186.675	44.126.934	44%
innerorts	50-150km	LNF	13	30.895.113	27.805.601	12.125.865	44%
innerorts	50-150km	LNF	14	235.505.530	211.954.977	92.432.361	44%
innerorts	50-150km	LNF	15	22.186.511	19.967.860	8.707.870	44%
innerorts	50-150km	LNF	16	87.731.675	78.958.507	34.433.356	44%
innerorts	50-150km	LNF	17	93.417.485	84.075.737	36.664.951	44%
innerorts	50-150km	LNF	18	29.447.310	26.502.579	11.557.624	44%
innerorts	50-150km	LNF	19	2.721.775.524	2.449.597.972	1.068.255.749	44%
innerorts	50-150km	LNF	20	0	0	0	44%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
Autobahn	>150km	LNF	01	32.042.932	28.838.639	12.576.366	44%
Autobahn	>150km	LNF	02	0	0	0	44%
Autobahn	>150km	LNF	03	0	0	0	44%
Autobahn	>150km	LNF	04	272.230.306	245.007.276	106.846.280	44%
Autobahn	>150km	LNF	05	43.653.275	39.287.947	17.133.250	44%
Autobahn	>150km	LNF	06	31.541.802	28.387.622	12.379.680	44%
Autobahn	>150km	LNF	07	0	0	0	44%
Autobahn	>150km	LNF	08	21.922.115	19.729.904	8.604.099	44%
Autobahn	>150km	LNF	09	165.700.354	149.130.318	65.034.884	44%
Autobahn	>150km	LNF	10	213.102.364	191.792.128	83.639.456	44%
Autobahn	>150km	LNF	11	99.158.864	89.242.977	38.918.355	44%
Autobahn	>150km	LNF	12	163.920.677	147.528.609	64.336.388	44%
Autobahn	>150km	LNF	13	45.044.597	40.540.137	17.679.323	44%
Autobahn	>150km	LNF	14	343.363.426	309.027.083	134.764.954	44%
Autobahn	>150km	LNF	15	32.347.590	29.112.831	12.695.940	44%
Autobahn	>150km	LNF	16	127.911.427	115.120.284	50.203.301	44%
Autobahn	>150km	LNF	17	136.201.251	122.581.126	53.456.932	44%
Autobahn	>150km	LNF	18	42.933.722	38.640.350	16.850.837	44%
Autobahn	>150km	LNF	19	3.968.306.679	3.571.476.011	1.557.500.384	44%
Autobahn	>150km	LNF	20	0	0	0	44%
außerorts	>150km	LNF	01	13.733.770	12.360.393	5.390.297	44%
außerorts	>150km	LNF	02	0	0	0	44%
außerorts	>150km	LNF	03	0	0	0	44%
außerorts	>150km	LNF	04	116.679.345	105.011.411	45.794.879	44%
außerorts	>150km	LNF	05	18.710.024	16.839.021	7.343.402	44%
außerorts	>150km	LNF	06	13.518.983	12.167.084	5.305.996	44%
außerorts	>150km	LNF	07	0	0	0	44%
außerorts	>150km	LNF	08	9.395.934	8.456.341	3.687.762	44%
außerorts	>150km	LNF	09	71.020.046	63.918.041	27.874.294	44%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
außerorts	>150km	LNF	10	91.336.797	82.203.118	35.848.312	44%
außerorts	>150km	LNF	11	42.500.012	38.250.011	16.680.612	44%
außerorts	>150km	LNF	12	70.257.267	63.231.540	27.574.915	44%
außerorts	>150km	LNF	13	19.306.352	17.375.717	7.577.451	44%
außerorts	>150km	LNF	14	147.167.376	132.450.638	57.760.970	44%
außerorts	>150km	LNF	15	13.864.348	12.477.913	5.441.547	44%
außerorts	>150km	LNF	16	54.823.512	49.341.161	21.517.400	44%
außerorts	>150km	LNF	17	58.376.575	52.538.917	22.911.923	44%
außerorts	>150km	LNF	18	18.401.620	16.561.458	7.222.358	44%
außerorts	>150km	LNF	19	1.700.837.174	1.530.753.457	667.552.880	44%
außerorts	>150km	LNF	20	0	0	0	44%
innerorts	>150km	LNF	01	5.977.939	5.380.145	2.346.251	44%
innerorts	>150km	LNF	02	0	0	0	44%
innerorts	>150km	LNF	03	0	0	0	44%
innerorts	>150km	LNF	04	50.787.365	45.708.628	19.933.273	44%
innerorts	>150km	LNF	05	8.143.968	7.329.571	3.196.384	44%
innerorts	>150km	LNF	06	5.884.448	5.296.003	2.309.557	44%
innerorts	>150km	LNF	07	0	0	0	44%
innerorts	>150km	LNF	08	4.089.796	3.680.817	1.605.183	44%
innerorts	>150km	LNF	09	30.913.106	27.821.795	12.132.927	44%
innerorts	>150km	LNF	10	39.756.439	35.780.795	15.603.801	44%
innerorts	>150km	LNF	11	18.499.106	16.649.196	7.260.620	44%
innerorts	>150km	LNF	12	30.581.089	27.522.980	12.002.615	44%
innerorts	>150km	LNF	13	8.403.533	7.563.180	3.298.260	44%
innerorts	>150km	LNF	14	64.057.980	57.652.182	25.141.789	44%
innerorts	>150km	LNF	15	6.034.776	5.431.298	2.368.558	44%
innerorts	>150km	LNF	16	23.863.193	21.476.873	9.365.942	44%
innerorts	>150km	LNF	17	25.409.745	22.868.770	9.972.941	44%
innerorts	>150km	LNF	18	8.009.728	7.208.755	3.143.697	44%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
innerorts	>150km	LNF	19	740.328.440	666.295.596	290.567.721	44%
innerorts	>150km	LNF	20	0	0	0	44%
Autobahn	internat.	LNF	01	10.042.643	9.038.379	3.941.586	44%
Autobahn	internat.	LNF	02	0	0	0	44%
Autobahn	internat.	LNF	03	0	0	0	44%
Autobahn	internat.	LNF	04	85.320.279	76.788.251	33.486.920	44%
Autobahn	internat.	LNF	05	13.681.466	12.313.319	5.369.768	44%
Autobahn	internat.	LNF	06	9.885.583	8.897.025	3.879.942	44%
Autobahn	internat.	LNF	07	0	0	0	44%
Autobahn	internat.	LNF	08	6.870.657	6.183.591	2.696.629	44%
Autobahn	internat.	LNF	09	51.932.500	46.739.250	20.382.721	44%
Autobahn	internat.	LNF	10	66.788.865	60.109.978	26.213.620	44%
Autobahn	internat.	LNF	11	31.077.590	27.969.831	12.197.484	44%
Autobahn	internat.	LNF	12	51.374.728	46.237.255	20.163.804	44%
Autobahn	internat.	LNF	13	14.117.523	12.705.771	5.540.914	44%
Autobahn	internat.	LNF	14	107.614.261	96.852.835	42.236.971	44%
Autobahn	internat.	LNF	15	10.138.127	9.124.314	3.979.062	44%
Autobahn	internat.	LNF	16	40.088.992	36.080.093	15.734.323	44%
Autobahn	internat.	LNF	17	42.687.124	38.418.411	16.754.051	44%
Autobahn	internat.	LNF	18	13.455.949	12.110.354	5.281.257	44%
Autobahn	internat.	LNF	19	1.243.715.430	1.119.343.887	488.139.505	44%
Autobahn	internat.	LNF	20	0	0	0	44%
außerorts	internat.	LNF	01	4.670.572	4.203.515	1.833.129	44%
außerorts	internat.	LNF	02	0	0	0	44%
außerorts	internat.	LNF	03	0	0	0	44%
außerorts	internat.	LNF	04	39.680.238	35.712.214	15.573.894	44%
außerorts	internat.	LNF	05	6.362.893	5.726.604	2.497.339	44%
außerorts	internat.	LNF	06	4.597.527	4.137.774	1.804.460	44%
außerorts	internat.	LNF	07	0	0	0	44%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
außerorts	internat.	LNF	08	3.195.363	2.875.827	1.254.132	44%
außerorts	internat.	LNF	09	24.152.452	21.737.207	9.479.472	44%
außerorts	internat.	LNF	10	31.061.761	27.955.584	12.191.271	44%
außerorts	internat.	LNF	11	14.453.377	13.008.040	5.672.732	44%
außerorts	internat.	LNF	12	23.893.047	21.503.742	9.377.660	44%
außerorts	internat.	LNF	13	6.565.692	5.909.123	2.576.935	44%
außerorts	internat.	LNF	14	50.048.588	45.043.730	19.643.314	44%
außerorts	internat.	LNF	15	4.714.979	4.243.481	1.850.558	44%
außerorts	internat.	LNF	16	18.644.346	16.779.911	7.317.624	44%
außerorts	internat.	LNF	17	19.852.669	17.867.402	7.791.872	44%
außerorts	internat.	LNF	18	6.258.011	5.632.210	2.456.175	44%
außerorts	internat.	LNF	19	578.419.636	520.577.672	227.020.963	44%
außerorts	internat.	LNF	20	0	0	0	44%
innerorts	internat.	LNF	01	4.015.941	3.614.346	1.576.196	44%
innerorts	internat.	LNF	02	0	0	0	44%
innerorts	internat.	LNF	03	0	0	0	44%
innerorts	internat.	LNF	04	34.118.623	30.706.761	13.391.044	44%
innerorts	internat.	LNF	05	5.471.065	4.923.958	2.147.310	44%
innerorts	internat.	LNF	06	3.953.134	3.557.821	1.551.545	44%
innerorts	internat.	LNF	07	0	0	0	44%
innerorts	internat.	LNF	08	2.747.499	2.472.749	1.078.352	44%
innerorts	internat.	LNF	09	20.767.225	18.690.502	8.150.822	44%
innerorts	internat.	LNF	10	26.708.118	24.037.307	10.482.533	44%
innerorts	internat.	LNF	11	12.427.580	11.184.822	4.877.637	44%
innerorts	internat.	LNF	12	20.544.178	18.489.760	8.063.279	44%
innerorts	internat.	LNF	13	5.645.439	5.080.895	2.215.750	44%
innerorts	internat.	LNF	14	43.033.737	38.730.363	16.890.091	44%
innerorts	internat.	LNF	15	4.054.123	3.648.711	1.591.182	44%
innerorts	internat.	LNF	16	16.031.139	14.428.025	6.291.980	44%

Straßentyp	Entfernungs- klasse	Größenklasse	GA	Fzg-km [km]	Kapazitäts-km [tkm]	VL [tkm]	Aus- lastung
innerorts	internat.	LNF	17	17.070.102	15.363.092	6.699.757	44%
innerorts	internat.	LNF	18	5.380.883	4.842.795	2.111.915	44%
innerorts	internat.	LNF	19	497.347.861	447.613.075	195.201.517	44%
innerorts	internat.	LNF	20	0	0	0	44%

Anmerkungen: In der Auslastungen sind Leerfahrten enthalten.

A3: Gesamtemissionen im Referenzjahr 2030

	Straße	Schiene	Binnengewässer	Seegewässer	Luft
HC - TTW	3.378 t	58 t	937 t	5.100 t	397 t
HC - WTT	37.348 t	3.035 t	1.009 t	4.953 t	5.986 t
HC - WTW	40.726 t	3.093 t	1.946 t	10.052 t	6.383 t
CO - TTW	44.746 t	122 t	3.266 t	18.923 t	3.765 t
CO - WTT	7.190 t	914 t	167 t	844 t	1.014 t
CO - WTW	51.936 t	1.036 t	3.433 t	19.767 t	4.779 t
NO _x - TTW	78.113 t	605 t	15.400 t	110.382 t	27.181 t
NO _x - WTT	28.296 t	1.585 t	715 t	3.567 t	4.367 t
NO _x - WTW	106.408 t	2.190 t	16.114 t	113.949 t	31.547 t
mKr - TTW	687.220 TJ	18.451 TJ	18.485 TJ	2.141.960 TJ	114.541 TJ
mKr - WTT	159.562 TJ	15.695 TJ	3.353 TJ	414.141 TJ	24.649 TJ
mKr - WTW	846.781 TJ	34.147 TJ	21.838 TJ	2.556.101 TJ	139.190 TJ
PM - TTW	2.095 t	8 t	308 t	7.719 t	369 t
PM - WTT	844 t	67 t	0 t	972 t	0 t
PM - WTW	2.939 t	74 t	308 t	8.691 t	369 t
CO ₂ - TTW	49.591.404 t	72.766 t	1.366.052 t	6.718.873 t	8.390.793 t
CO ₂ - WTT	8.031.021 t	1.620.476 t	274.881 t	982.262 t	1.501.192 t
CO ₂ - WTW	57.622.425 t	1.693.242 t	1.640.933 t	7.701.136 t	9.891.985 t
NMHC - TTW	2.271 t	57 t	849 t	4.977 t	375 t
NMHC - WTT	16.819 t	86 t	488 t	2.549 t	2.978 t
NMHC - WTW	19.090 t	143 t	1.336 t	7.527 t	3.353 t
SO ₂ - TTW	248 t	0 t	7 t	56.590 t	2.248 t
SO ₂ - WTT	23.596 t	34 t	646 t	5.299 t	3.923 t
SO ₂ - WTW	23.843 t	34 t	653 t	61.889 t	6.171 t

	Straße	Schiene	Binnengewässer	Seegewässer	Luft
CO _{2eq} - TTW	47.924.705 t	67.961 t	1.373.792 t	6.793.427 t	8.461.713 t
CO _{2eq} - WTT	12.381.101 t	1.723.658 t	288.090 t	986.560 t	1.586.237 t
CO _{2eq} - WTW	60.305.806 t	1.791.619 t	1.661.882 t	7.779.987 t	10.047.950 t

A4: Quellenverzeichnis der Literaturrecherche

2019-transport-in-the-eu-current-trends-and-issues.pdf (n.d.):

<https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2019-transport-in-the-eu-current-trends-and-issues.pdf>. (13.05.2020).

Abareshi, A.; Molla, A. (2013): Greening logistics and its impact on environmental performance: an absorptive capacity perspective. In: *International Journal of Logistics: Research and Applications*. Vol. 16, No.3, S. 209–226.

Abbasi, M.; Nilsson, F. (2012): Themes and challenges in making supply chains environmentally sustainable. Vol. 17, No.5, S. 517–530.

Afshar-Bakeshloo, M.; Mehrabi, A.; Safari, H.; Maleki, M.; Jolai, F. (2016): A green vehicle routing problem with customer satisfaction criteria. In: *Journal of Industrial Engineering International*. Vol. 12, S. 529–544.

Akkad, M. Z.; Bányai, T. (2020): Cyber-physical waste collection system: A logistics approach. S. 160–168.

ALICE (2017): A truly integrated transport system for sustainable and efficient logistics. Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe.

ALICE (2019): Roadmap towards Zero Emissions Logistics 2050. Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe. <http://www.etp-logistics.eu/wp-content/uploads/2019/12/Alice-Zero-Emissions-Logistics-2050-Roadmap-WEB.pdf> (23.07.2020).

Allegre, T.; Paché, G. (2014): No More Trouble: Driving a Sustainable City Logistics. In: *Advances in Management & Applied Economics*. Vol. 4, No.5, S. 1–11.

Alt, S. A. (2020): Vorstellung und Analyse von Umschlagkonzepten und -Technologien des Kombinierten Verkehrs unter besonderer Würdigung ihrer Tauglichkeit für ausgewählte Gütergruppen. Hochschule Kaiserslautern. <https://elib.dlr.de/134265/> (08.04.2020).

Andaloro, L.; Napoli, G.; Sergi, F.; Micari, S.; Agnello, G.; Antonucci, V. (2015): Development of a New Concept Electric Vehicle for Last Mile Transportations. Vol. 7, No.3, S. 342–348.

Andelmin, J.; Bartolini, E. (2017): An Exact Algorithm for the Green Vehicle Routing Problem. In: *Transportation Science*. INFORMS: Institute for Operations Research. Vol. 51, No.4, S. 1288–1303.

Asghari, M.; Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J. (2020): A green delivery-pickup problem for home hemodialysis machines; sharing economy in distributing scarce resources. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. Vol. 134.

Awwad, M.; Shekhar, A.; Sundaranarayanan Iyer, A. (2018): Sustainable Last-Mile Logistics Operation in the Era of E-Commerce. *IEOM Society International, Washington DC, USA*. S. 584–591.

Bajdor, P. (2012): Comparison between sustainable development concept and green logistics – The Literature Review. In: *Polish Journal of Management Studies*. Vol. 5, S. 236–244.

Bányai, T. (2018): Real-Time Decision Making in First Mile and Last Mile Logistics: How Smart Scheduling Affects Energy Efficiency of Hyperconnected Supply Chain Solutions. In: *Energies*. Vol. 11, No.7.

Bates, O.; Friday, A.; Allen, J.; Cherrett, T.; McLeod, F.; Bektas, T.; Nguyen, T.; Piecyk, M.; Piotrowska, M.; Wise, S.; Davies, N. (2018): Transforming Last-Mile Logistics: Opportunities for more Sustainable Deliveries. In: *CHI 2018*. Montréal. S. 1–14.

Bauer, J.; Bektas, T.; Crainic, T. G. (2010): Minimizing greenhouse gas emissions in intermodal freight transport: An application to rail service design. In: *JORS*. Vol. 61, S. 530–542.

Bayarçelik, E. B.; Bumin Doyduk, H. B. (2020): Digitalization of Business Logistics Activities and Future Directions. In: *Contributions to Management Science*. S. 201–238.

- Bektas, T.; Ehmke, J. F.; Psaraftis, H. N.; Puchinger, J. (2019): The role of operational research in green freight transportation. In: *European Journal of Operational Research*. Vol. 274, No.3, S. 807–823.
- Besselink, B.; Turri, V.; Hoef, S.; Liang, K.-Y.; Alam, A.; Mårtensson, J.; Johansson, K. (2015): Cyber–Physical Control of Road Freight Transport. In: *Proceedings of the IEEE*. Vol. 104.
- Bi, K.; Yang, M.; Zhou, X.; Zahid, L.; Zhu, Y.; Sun, Z. (2020): Reducing carbon emissions from collaborative distribution: a case study of urban express in China. In: *Environmental Science and Pollution Research*.
- BIEK (2017): Nachhaltigkeitsstudie 2017.
- BIEK (2018): KEP-Studie 2018 – Analyse des Marktes in Deutschland. Köln.
- Boenzi, F.; Digiesi, S.; Facchini, F.; Mossa, G.; Mummolo, G. (2016): Greening activities in warehouses: A model for identifying sustainable strategies in material handling. In: *DAAAM International*. S. 980–988.
- Bogdanski, R.; Ohm, G. S. (2017): Projektsteckbrief - Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg. Nürnberg.
- Böttcher, C.; Müller, M. (2016): Insights on the impact of energy management systems on carbon and corporate performance. An empirical analysis with data from German automotive suppliers. In: *Journal of Cleaner Production*. Vol. 137, S. 1449–1457.
- Bouchery, Y.; Fransoo, J. (2015): Cost, carbon emissions and modal shift in intermodal network design decisions. In: *International Journal of Production Economics*. Vol. 164, S. 388–399.
- Bretzke, W.-R. (2011): Sustainable Logistics: in search of solutions for a challenging new problem. Vol. 7, S. 179–189.
- Buldeo Rai, H.; Verlinde, S.; Merckx, J.; Macharis, C. (2017): Crowd logistics: an opportunity for more sustainable urban freight transport? Vol. 9, S. 39.
- Burinskiene, A.; Lorenc, A.; Lerher, T. (2018): A simulation study for the sustainability and reduction of waste in warehouse logistics. In: *International Journal of Simulation Modelling*. Vol. 17, No.3, S. 485–497.
- Byers, E. A.; Gasparatos, A.; Serrenho, A. C. (2015): A framework for the exergy analysis of future transport pathways: Application for the United Kingdom transport system 2010–2050. In: *Energy*. Vol. 88, S. 849–862.
- Casper, R.; Sundin, E. (2018): Reverse Logistic Transportation and Packaging Concepts in Automotive Remanufacturing. In: *Procedia Manufacturing*. Vol. 52, S. 154–160.
- Cheba, K.; Saniuk, S. (2016): Sustainable Urban Transport - The Concept of Measurement in the Field of City Logistics. S. 35–45.
- Cheng, C.; Qi, M.; Wang, X.; Zhang, Y. (2016): Multi-period inventory routing problem under carbon emission regulations. In: *International Journal of Production Economics*. Vol. 182, S. 263–275.
- Chocholac, J.; Sommerauerova, D.; Hyrslova, J.; Kucera, T.; Hruska, R.; MacHalik, S. (2020): Service quality of the urban public transport companies and sustainable city logistics. In: *Open Engineering*. Vol. 10, No.1, S. 86–97.
- Ćirović, G.; Pamučar, D.; Božanić, D. (2014): Green logistic vehicle routing problem: Routing light delivery vehicles in urban areas using a neuro-fuzzy model. In: *Expert Systems with Applications*. Vol. 41, No.9, S. 4245–4258.
- Cleophas, C.; Cottrill, C.; Ehmke, J. F.; Tierney, K. (2019): Collaborative urban transportation: Recent advances in theory and practice. In: *European Journal of Operational Research*. Vol. 273, No.3, S. 801–816.
- Conway, A.; Fatisson, P.-E.; Eickemeyer, P.; Cheng, J.; Peters, D. (2011): Urban Micro-Consolidation and Last Mile Goods Delivery by Freight-Tricycle in Manhattan: Opportunities and Challenges.
- Correia, A.; Amaya, S.; Meyer, S.; Kumagai, M.; Okude, M. (2010): Eco Routing for European Market. In: *In 17th ITS World Congress*. Busan, Korea.

- Corsten, H.; Roth, S. (2012): Nachhaltigkeit. Unternehmerisches Handeln in globaler Verantwortung. Springer, Wiesbaden.
- Dallasega, P.; Stecher, T.; Rauch, E.; Matt, D. T. (2018): Sustainable city logistics through shared resource concepts. S. 600–610.
- DCTI (2015): Klimafreundlich einkaufen: Eine vergleichende Betrachtung von Onlinehandel und stationärem Einzelhandel. Deutsches CleanTech Institut (DCTI).
http://www.pressebereich20.de/download/DCTI_Studie/Studie_Klimafreundlich_Einkaufen.pdf (29.04.2020).
- Deckert, C. (2016): CSR und Logistik: Spannungsfelder Green Logistics und City-Logistik. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Deckert, C.; Fröhlich, E. (2014): Green Logistics: Framework zur Steigerung der logistischen Nachhaltigkeit. In: Supply Chain Management. Vol. 11.
- Deckert, C.; Mäckel, F. (2016): Bestimmung des Carbon Footprints in der Transportbranche – Status und Entwicklungstendenzen in Nordrhein-Westfalen. In: uwf UmweltWirtschaftsForum. Vol. 24.
- Demir, E.; Bektaş, T.; Laporte, G. (2014): A review of recent research on green road freight transportation. In: European Journal of Operational Research. Vol. 237, No.3, S. 775–793.
- Dey, A.; LaGuardia, P.; Srinivasan, M. (2011): Building sustainability in logistics operations: a research agenda. Vol. 34, No.11, S. 1237–1259.
- DHL (2020): Logistics Trend Radar 2018/2019.
- Dong, C.; Transchel, S.; Hoberg, K. (2018): An inventory control model for modal split transport: A tailored base-stock approach. In: European Journal of Operational Research. Vol. 264, No.1, S. 89–105.
- Dörr, H.; Marsch, V.; Romstorfer, A.; Toifl, Y. (2019): Multidisziplinäre Pfade und interdisziplinäre Strategien zur nachhaltigen Gewährleistung guter Luftqualität mit besonderem Augenmerk auf den Straßengüterverkehr. In: Kolloquium Luftqualität an Straßen 2019Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV)(DEU)(Road and Transportation Research Association).
- Ehrler, V. C.; Lobig, A.; Rischke, D. (2019): E-vehicles for urban logistics-why is it not happening yet? Requirements of an innovative and sustainable urban logistics concept. In: Urban Freight Transportation Systems. S. 223–238.
- El-Berishy, N.; Rügge, I.; Scholz-Reiter, B. (2013): The Interrelation between Sustainability and Green Logistics. In: IFAC Proceedings Volumes. 6th IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics. Vol. 46, No.24, S. 527–531.
- Elbert, R.; Friedrich, C.; Boltze, M.; Pfohl, H.-C. (2019): Urban freight transportation systems: Current trends and prospects for the future. In: Urban Freight Transportation Systems. S. 265–276.
- Erdoğan, S.; Miller-Hooks, E. (2012): A Green Vehicle Routing Problem. In: Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. Select Papers from the 19th International Symposium on Transportation and Traffic Theory. Vol. 48, No.1, S. 100–114.
- Evangelista, P. (2014): Environmental sustainability practices in the transport and logistics service industry: An exploratory case study investigation. In: Research in Transportation Business & Management. Sustainable Freight Transport. Vol. 12, S. 63–72.
- Faber, J.; Huigen, T.; Nelissen, D. (2017): Regulating speed: a short-term measure to reduce maritime GHG emissions. CE Delft, Delft. <https://cedelft.eu/en/publications/2024/regulating-speed-a-short-term-measure-to-reduce-maritime-ghg-emissions> (25.05.2020).
- Faccio, M.; Gamberi, M. (2015): New City Logistics Paradigm: From the “Last Mile” to the “Last 50 Miles” Sustainable Distribution. Vol. 7, No.11, S. 14873–14864.

- Frasquet, C. P.; Indinger, T. (2013): Numerische Untersuchungen zur Aerodynamik von Nutzfahrzeugkombinationen bei realitätsnahen Fahrbedingungen unter Seitenwindeinfluss. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., Berlin.
- Fraunhofer ISI (2019): Alternative powertrains in road-bound heavy-duty transport: a quantitative determination of user requirements for heavy-duty vehicles and their infrastructure. Working Paper Sustainability and Innovation.
- Frei, R.; Jack, L.; Krzyzaniak, S.-A. (2020): Sustainable reverse supply chains and circular economy in multichannel retail returns. In: Business Strategy and the Environment.
- Freitas da Silva, F.; de Assis Rangel, J. J.; Almeida Peixoto, T.; de Oliveira Matias, Í.; Reis Tavares, E. (2017): Simulation Optimization for Analysis of sustainable logistics systems. In: Pesquisa Operacional. Vol. 37, No.1, S. 145–171.
- Fröhlich, E. (2015): CSR und Beschaffung. Theoretische wie praktische Implikationen eines nachhaltigen Beschaffungsprozessmodells. Management-Reihe Corporate Social Responsibility. Springer, Köln.
- García-Arca, J.; Prado-Prado, J. C.; Gonzales-Portela Garrido, a. T.; Arnäs, O.; Johansson, M. (2014): “Packaging logistics”: Promoting sustainable efficiency in supply chains. Vol. 44, No.4, S. 325–346.
- Gavaers, R.; van de Voorde, E.; Vanellander, T. (2009): Characteristics of Innovations in last-mile logistics - using best practices, case studies and making the link with green and sustainable logistics.
- Gevaers, R.; Vanellander, T. (n.d.): Overzicht en evolutie kansrijke procesinnovaties in logistiek voor de Vlaamse context. Antwerpen.
- Glöckner, M.; Pufahl, L.; Franczyk, B.; Weske, M.; Ludwig, A. (2020): Conceptualization of a smart service platform for last mile logistics. In: Communications in Computer and Information Science. Vol. 1189 CCIS, S. 175–184.
- Goodchild, A. (2011): Cost, emissions, and customer service trade-off analysis in pickup and delivery systems.
- Graichen, J.; Healy, S. (2019): Impact of slow steaming for different types of ships carrying bulk cargo. Öko-Institut, Freiburg. S. 16.
- Gucwa, M.; Schäfer, A. (2013): The impact of scale on energy intensity in freight transportation. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment. Vol. 23, S. 41–49.
- Hao, H.; Liu, Z.; Zhao, F. (2017): An overview of energy efficiency standards in China’s transport sector. In: Renewable & Sustainable Energy Reviews. Vol. 67, S. 246–256.
- Hardi, L.; Wagner, U. (2019): Grocery Delivery or Customer Pickup—Influences on Energy Consumption and CO2 Emissions in Munich. In: Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Vol. 11, No.3, S. 641.
- Hasenfuß, J.; Galbarz, F. (2020): Herausforderungen und Lösungsansätze urbaner Logistikanforderungen. In: C. Etezadzadeh (Hrsg.): Smart City – Made in Germany. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. S. 579–586.
- Heggen, H.; Molenbruch, Y.; Caris, A.; Braekers, K. (2019): Intermodal Container Routing: Integrating Long-Haul Routing and Local Drayage Decisions. In: Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Vol. 11, No.6, S. 1634.
- Heidt, C.; Biermann, K.; Dünnebeil, F.; Jamet, M.; Lambrecht, U.; Althaus, H.-J.; Wüthrich, P.; Hausberger, S. (2019): Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO2-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen. Abschlussbericht, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-bewertung-von-massnahmen-zur> (24.09.2020).
- Heinold, A.; Meisel, F. (2018): Emission rates of intermodal rail/road and road-only transportation in Europe: A comprehensive simulation study. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment. Vol. 65, S. 421–437.

- Helmig, J.; Cuber, S.; Schoth, A. (2011): Sustainable design of company networks: An approach to the evaluation of the deployment of logistics concepts. In: ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. Vol. 106, No.1–2, S. 80–82.
- Helo, P.; Ala-Harja, H. (2018): Green logistics in food distribution - a case study. In: International journal of logistics research and applications. Vol. 21, No.4, S. 524–537.
- Hochschule Emden/Leer; Becker, T.; Funke, T.; Universität Bremen und BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH; Coordes, J.; Universität Bremen (2018): Auslastungsmessung in LKW-Laderäumen Ein Überblick über vorhandene Technologien und ein Praxistest mit Ultraschallsensorik in der Automobillogistik. In: Industrie 4.0 Management. Vol. 2018, No.5.
- Hochschule für Technik Stuttgart; Ege, R.; Kornmann, M.; Stöver, C.; Uckelmann, D. (2019): Ökologische Logistikgebäude. In: Industrie 4.0 Management. Vol. 2019, No.6, S. 51–54.
- Hu, W.; Dong, J.; Hwang, B.; Ren, R.; Chen, Z. (2019): A Scientometrics Review on City Logistics Literature: Research Trends, Advanced Theory and Practice. In: Sustainability. Vol. 11, No.10, S. 2724.
- Irzik, M. (2017): Feldversuch mit Lang-Lkw in Deutschland. Bergisch Gladbach.
- Iwan, S.; Allesch, J.; Celebi, D.; Kijewska, K.; Hoé, M.; Klauenberg, K.; Zajicek, J. (2019): Electric mobility in European urban freight and logistics –status and attempts of improvement. In: Transportation Research Procedia. Vol. 39, S. 112–123.
- Jellinek, R.; Raimund, W.; Schübl, J.; Zopf-Renner, C.; Wrighton, S.; Anzböck, R.; Weber, F. (2016): Radkombitransport (RAKO) Donaukanal - Konzept für eine moderne City Logistik per Wasser und Rad. S. 105.
- Julianelli, V.; Caiado, R. G. G.; Scavarda, L. F.; Cruz, S. P. de M. F. (2020): Interplay between reverse logistics and circular economy: Critical success factors-based taxonomy and framework. In: Resources, Conservation and Recycling. Vol. 158, S. 104784.
- Kaledinova, E.; Langerak, T.; Pieters, R.; Sterre, P.; Weijers, S. (2015): Learning from experiences in sustainable transport practice: green freight Europe and the implementation of a best cases database. In: LogForum. Vol. 2015, S. 78–86.
- Kannegiesser, M.; Günther, H.-O. (2014): Sustainable development of global supply chains—part 2: investigation of the European automotive industry. In: Flexible Services and Manufacturing Journal. Vol. 26, S. 48–68.
- Kaup, S.; Demircioglu, A. (2017): Von der Crowd-Logistik hin zu einem ganzheitlichen Ansatz hocheffizienten Warentransports. In: springerprofessional.de. Vol. Wirtschaftsinformatik & Management, No.3.
- Kestner, T. (2020): Ressourceneffizienz in Handel und Logistik. VDI Zentrum Ressourceneffizienz.
- Kin, B.; Ambra, T.; Verlinde, S.; Macharis, C. (2018): Tackling Fragmented Last Mile Deliveries to Nanostores by Utilizing Spare Transportation Capacity - A Simulation Study. Vol. 10, No.3, S. 653.
- Kitjacharoenchai, P.; Lee, S. (2019): Vehicle Routing Problem with Drones for Last Mile Delivery. Vol. 39, S. 314–324.
- Kitzmann, H.; Falko, S.; Prause, G. K. (2020): Risk Assessment of Logistics Hub Development Along Green Transport Corridors: The Case of Paldiski Port. In: Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 117, S. 341–350.
- Kläsger, M. (n.d.): Einkaufen: Wie klimaschädlich ist der Onlinehandel? In: Süddeutsche.
- Klebsch, D. W. (2020): Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Frankfurt am Main. S. 108.
- Koblianska, I. (2019): Ecologically related transformation of the logistics theory: directions and content. In: Environmental Economics. Vol. 9, S. 44–49.

- Koch, S. (2012a): Green Logistics. In: Logistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. S. 291–326.
- Koch, S. (2012b): Grundlagen der Logistik. In: Logistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. S. 1–24.
- Koch, S. (2012c): Logistik: eine Einführung in Ökonomie und Nachhaltigkeit. Springer Vieweg, Berlin.
- Koch, S. (2012d): Supply Chain Management. In: Logistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. S. 245–289.
- Kramer, R.; Maculan, N.; Subramanian, A.; Vidal, T. (2015): A speed and departure time optimization algorithm for the pollution-routing problem. In: European Journal of Operational Research. Vol. 247, No.3, S. 782–787.
- Kramer, R.; Subramanian, A.; Vidal, T.; Cabral, L. dos A. F. (2015): A matheuristic approach for the Pollution-Routing Problem. In: European Journal of Operational Research. Vol. 243, No.2, S. 523–539.
- Krause, J.; Thiel, C.; Tsokolis, D.; Samaras, Z.; Rota, C.; Ward, A.; Prenninger, P.; Coosemans, T.; Neugebauer, S.; Verhoeve, W. (2020): EU road vehicle energy consumption and CO2 emissions by 2050 – Expert-based scenarios. In: Energy Policy. Vol. 138, S. 111224.
- Lampe, W. (2017): Konsolidierung von Emissionsindikatoren. S. 4.
- Larroché, E.; Muerza, V. (2019): Improving cost efficiency and environmental impact through the integration of light freight and passenger railway transport and last-mile distribution analysis. In: Urban Freight Transportation Systems. Joe Hayton, Darmstadt/Shanghai. S. 55–78.
- Lazarević, D.; Švadlenka, L.; Radojičić, V.; Dobrodolac, M. (2020): New Express Delivery Service and Its Impact on CO2 Emissions. Vol. 12, No.2.
- León-Jácome, J. C.; Herrera-Granda, I. D.; Lorente-Leyva, L. L.; Montero-Santos, Y.; Herrera-Granda, E. P.; Esparza, D. E. I.; León, J. G. J. (2020): Optimization of urban solid waste collection under a geographic information systems approach, a case study. In: RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao. Vol. 2020, No.E29, S. 479–493.
- Letnik, T.; Marksel, M.; Luppino, G.; Bardi, A.; Božičnik, S. (2018): Review of policies and measures for sustainable and energy efficient urban transport. In: Energy. Vol. 163, S. 245–257.
- Liebetruht, T. (2020): Bedeutung von Supply Chain Process Management. In: Prozessmanagement in Einkauf und Logistik. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. S. 1–26.
- Liimatainen, H.; Greening, P.; Dadhich, P.; Keyes, A. (2018): Possible Impact of Long and Heavy Vehicles in the United Kingdom—A Commodity Level Approach. In: Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Vol. 10, No.8, S. 2754.
- Lindstad, E. (2019): Increased use of LNG might not reduce maritime GHG emissions at all.
- Llano, C.; Pérez-Balsalobre, S.; Pérez-García, J. (2018): Greenhouse Gas Emissions from Intra-National Freight Transport: Measurement and Scenarios for Greater Sustainability in Spain. In: Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Vol. 10, No.7, S. 2467.
- Lochmahr, A. (2016): Praxishandbuch Grüne Automobillogistik. Springer Verlag, Stuttgart.
- Lu, M.; de Bock, J. (2016): Sustainable Logistics and Supply Chains - Innovations and Integral Approaches. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Luis Osorio-Tejada, J.; Llera-Sastresa, E.; Scarpellini, S. (2017): Liquefied natural gas: Could it be a reliable option for road freight transport in the EU? In: Renewable & Sustainable Energy Reviews. Vol. 71, S. 785–795.
- Macharis, C.; Melo, S. (2011): City distribution and Urban freight transport: Multiple perspectives. NECTAR Series on Transportation and Communication Network Research. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK.
- Mallidis, I.; Vlachos, D. (2010): A Framework for Green Supply Chain Management. In: 1st Olympus International Conference on Supply Chains.

- Manns, P. (2020): Wege aus der Enge - Logistik in den Innenstädten. In: Logistik - die unterschätzte Zukunftsindustrie. Strategien und Lösungen entlang der Supply Chain 4.0. Voß, Peter. S. 123–139.
- McKinnon, A.; Cullinane, S.; Browne, M.; Whiteing, A. (2010): Green Logistics: Improving the environmental sustainability of logistics. Kogan Page Publishers, London, Philadelphia, New Delhi.
- Meersman, H.; Van de Voorde, E. (2019): Freight transport models: Ready to support transport policy of the future? In: Transport Policy. Vol. 83, S. 97–101.
- Melkonyan, A.; Gruchmann, T.; Lohmar, F.; Kamath, V.; Spinler, S. (2020): Sustainability assessment of last-mile logistics and distribution strategies: The case of local food networks. In: International Journal of Production Economics. Vol. 228, S. 107746.
- Minashkina, D.; Happonen, A. (2020): Decarbonizing warehousing activities through digitalization and automatization with WMS integration for sustainability supporting operations. In: E3S Web of Conferences. Vol. 158.
- Minett, C. F.; Salomons, A. M.; Daamen, W.; Van Arem, B.; Kuijpers, S. (2011): Eco-routing: Comparing the fuel consumption of different routes between an origin and destination using field test speed profiles and synthetic speed profiles. In: Integrated and Sustainable Transportation System (FISTS), 2011 IEEE Forum. S. 32–39.
- Moll, C. (2019): Nachhaltige Dienstleistungsinnovationen in der Logistik: Ein Ansatz zur Entwicklung von Entscheidungsmodellen. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Morfoulaki, M.; Kotoula, K.; Stathacopoulos, A.; Mikiki, F.; Aifadopoulou, G. (2016): Evaluation of Specific Policy Measures to Promote Sustainable Urban Logistics in Small-medium Sized Cities: The Case of Serres, Greece. Vol. 12, S. 667–678.
- Mostert, M.; Caris, A.; Limbourg, S. (2017): Road and intermodal transport performance: the impact of operational costs and air pollution external costs. In: Research in Transportation Business & Management. Intermodal freight transport management. Vol. 23, S. 75–85.
- Navarro, C.; Roca-Riu, M.; Furió, S.; Estrada, M. (2016): Designing New Models for Energy Efficiency in Urban Freight Transport for Smart Cities and its Application to the Spanish Case. Vol. 12, S. 314–324.
- Neghabadi, P. D.; Samuel, K. E.; Espinouse, M.-L. (2019): Systematic literature review on city logistics: overview, classification and analysis. In: International Journal of Production Research. Vol. 57, No.3, S. 865–887.
- Nesterova, N.; van Rooijen, T.; Talen, S.; Verlinde, S.; Kin, B. (2017): CITYLAB - City Logistics in Living Laboratories: Reducing impacts and costs of freight and service trips in urban areas. Sustainability analysis of CITYLAB solutions, European Commission. S. 155. <https://cordis.europa.eu/project/id/635898/results/de> (30.03.2020).
- Ninnemann, J.; Hölter, A.-K.; Beecken, W.; Thyssen, R.; Tesch, T. (n.d.): Last-Mile-Logistics Hamburg – Innerstädtische Zustelloogistik. S. 180.
- Nocerino, R.; Colorni, A.; Lia, F.; Luè, A. (2016): E-bikes and E-scooters for smart logistics: environmental and economic sustainability in pro-E-bike Italian pilots. Vol. 14, S. 2362–2371.
- Norlund, E. K.; Gribkovskaia, I. (2015): Modal split in offshore supply network under the objective of emissions minimization. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment. Vol. 35, S. 160–174.
- Notteboom, T.; van der Lugt, L.; van Saase, N.; Sel, S.; Neyens, K. (2020): The Role of Seaports in Green Supply Chain Management: Initiatives, Attitudes, and Perspectives in Rotterdam, Antwerp, North Sea Port, and Zeebrugge. In: Sustainability. Vol. 12, No.4, S. 1688.
- Nürnberg, M. (2019): Analysis of using cargo bikes in urban logistics on the example of Stargard. Vol. 39, S. 360–369.

- de Oliveira, C.; De Mello Bandeira, R. A.; Vasconcelos Goes, G.; Schmitz Gonçalves, D. N.; de Almeida D'Agosto, M. (2017): Sustainable Vehicles-Based Alternatives in Last Mile Distribution of Urban Freight Transport: A Systematic Literature Review. Vol. 9, No.8, S. 1324.
- Pan, S.; Ballot, E.; Fontane, F. (2013): The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by pooling supply chains. In: *International Journal of Production Economics*. Vol. 143, No.1, S. 86–94.
- Pfennig, R. (2019): Nachhaltige Logistik als Säule eines integrierten Nachhaltigkeitsmanagements. In: M. ENGLERT / A. TERNÈS: *Nachhaltiges Management*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. S. 581–592.
- Pinchasik, D. R.; Hovi, I. B.; Mjøsund, C. S.; Grønland, S. E.; Fridell, E.; Jerksjö, M. (2020): Crossing Borders and Expanding Modal Shift Measures: Effects on Mode Choice and Emissions from Freight Transport in the Nordics. In: *Sustainability*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Vol. 12, No.3, S. 894.
- Pishvaei, M. S.; Torabi, S. A.; Razmi, J. (2012): Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty. In: *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 62, No.2, S. 624–632.
- Qian, J.; Eglese, R. (2016): Fuel emissions optimization in vehicle routing problems with time-varying speeds. In: *European Journal of Operational Research*. Vol. 248, No.3, S. 840–848.
- Rakhmangulov, A.; Sladkowski, A.; Osintsev, N.; Muravev, D. (2017): Green logistics: Element of the sustainable development concept. Part 1. In: *Nase More*. Vol. 64, No.3, S. 120–126.
- Ramos, T. R. P.; Gomes, M. I.; Barbosa-Povoa, A. P. (2012): Minimizing CO2 emissions in a recyclable waste collection system with multiple depots. In: *EUROMA/POMS joint conference*. Amsterdam, The Netherlands.
- Ramudhin, A.; Chaabane, A.; Paquet, M. (2010): Carbon market sensitive sustainable supply chain network design. Vol. 5, No.1, S. 30–38.
- Ranieri, L.; Digiesi, S.; Silvestri, B.; Roccotelli, M. (2018): A Review of Last Mile Logistics Innovations in an Externalities Cost Reduction Vision. Vol. 10, No.3.
- Russo, F.; Comi, A. (2016): Urban Freight Transport Planning towards Green Goals: Synthetic Environmental Evidence from Tested Results. In: *Sustainability*. Vol. 8, No.4, No.381.
- Saeedi, H.; Behdani, B.; Wiegmans, B.; Zuidwijk, R. (2019): Assessing the technical efficiency of intermodal freight transport chains using a modified network DEA approach. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. Vol. 126, S. 66–86.
- Saenz-Esteruelas, J.; Figliozzi, M.; Serrano, A.; Faulin, J. (2016): Electrifying Last-Mile Deliveries: A Carbon Footprint Comparison between Internal Combustion Engine and Electric Vehicles. In: *Smart Cities. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham. S. 76–84.
- Saroha, R. (2014): Green logistics & its significance in modern day systems. In: *International Review of Allied Engineering Research*. Vol. 4, No.1, S. 89–92.
- Sbihi, A.; Eglese, R. (2010): Combinatorial optimization and Green Logistics. In: *Annals of Operations Research*. Vol. 175, S. 254–5330.
- Schirdewahn, F. (2013): Analyse der Effizienz einzelner Maßnahmen zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes in der Transportlogistik. In: *Wismarer Diskussionspapiere*. No.4.
- Schlautmann (2020): Bitte bündeln! In: *Handelsblatt*.
- Schliwa, G.; Armitage, R.; Aziz, S.; Evans, J.; Rhoades, J. (2015): Sustainable city logistics - Making cargo cycles viable for urban freight transport. Vol. 26, S. 50–57.
- Schneider, M.; Stenger, A.; Goeke, D. (2014): The Electric Vehicle-Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations. In: *Transportation Science*. Vol. 48, S. 500–520.

- Schröder, M.; Cabral, P. (2019): Eco-friendly 3D-Routing: A GIS based 3D-Routing-Model to estimate and reduce CO₂-emissions of distribution transports. In: *Computers, Environment and Urban Systems*. Vol. 73, S. 40–55.
- Schuh, G.; Helmig, J. (2011): Sustainable design of logistic networks - Assessment of the use of logistic concepts by using an eco-efficient performance measurement system. In: *ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. Vol. 106, No.9, S. 626–629.
- Scott, C.; Urquhart, N.; Hart, E. (2010): Influence of topology and payload on CO₂ optimized vehicle routing. In: *Applications of Evolutionary Computation*. No.6025, S. 141–150.
- Sengazani Murugesan, V.; Sequeira, A. H.; Jauhar, S. K.; Kumar, V. (2020): Sustainable postal service design: integrating quality function deployment from the customers perspective. In: *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*.
- Shahmohammadi, S.; Steinmann, Z. J. N.; Tambjerg, L.; van Loon, P.; King, J. M. H.; Huijbregts, M. A. J. (2020): Comparative Greenhouse Gas Footprinting of Online versus Traditional Shopping for Fast-Moving Consumer Goods: A Stochastic Approach. In: *Environmental Science & Technology*. Vol. 54, No.6, S. 3499–3509.
- Silbermayr, L.; Jammerneegg, W.; Kischka, P. (2017): Inventory pooling with environmental constraints using copulas. In: *European Journal of Operational Research*. Vol. 263, No.2, S. 479–492.
- de Souza, R.; Goh, M.; Lau, H.-C.; Ng, W.-S.; Tan, P.-S. (2014): Collaborative Urban Logistics - Synchronizing the Last Mile. *Procedia*. Vol. 125, S. 422–431.
- Soysal, M.; Bloemhof-Ruwaard, J. M.; Bektaş, T. (2015): The time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations. In: *International Journal of Production Economics*. Vol. 164, S. 366–378.
- Spitz, B. (2012): Nachhaltigkeit in der Logistik unter besonderer Betrachtung der Emissionsreduzierung im Güterverkehr. *BoD-Books on Demand*.
- Stalling, P. (2014): Policy instruments for reducing CO₂-emissions from the Swedish freight transport sector. In: *Research in Transportation Business & Management. Sustainable Freight Transport*. Vol. 12, S. 47–54.
- Stenico de Campos, R.; Tadeu Simon, A.; de Campos Martins, F. (2019): Assessing the impacts of road freight transport on sustainability: A case study in the sugar-energy sector. In: *Journal of Cleaner Production*. Vol. 220, S. 995–1004.
- Stockmann, M. (2017): Potenziale einer geräuscharmen Nachtlogistik (GeNaLog). Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund. <https://www.genalog.de/studie-potenziale-einer-geraeuscharmen-nachtlogistik-ab-sofort-verfuegbar/> (19.03.2020).
- von Storch, H. (2019): Nachhaltige Kraftstoffe für die Logistik. Status, Perspektiven, Lösungen. Deutsche Post DHL Group, Bonn. <https://www.dpdhl.com/de/zukunft-logistik/studien/nachhaltige-kraftstoffe.html> (19.03.2020).
- Su, Y.; Fan, Q.-M. (2020): The Green Vehicle Routing Problem from a Smart Logistics Perspective. In: *IEEE Access*. Vol. 8.
- Sun, X.; Gao, L.; Lan, Y. (2020): Analysis of the Efficiency of China's Cold Chain Logistics Enterprises from the Perspective of Green Supply Chain.
- Sure, M. (2017): Internationales Logistikmanagement. In: *Internationales Management - Grundlagen, Strategien und Konzepte*. Springer Gabler, Wiesbaden. S. 217–231.
- Süßmann, A.; Lienkamp, M. (2015): Technische Möglichkeiten der CO₂-Emissionen von Nutzfahrzeugen. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

- Tang, L. (2013): Study on the relationship between green logistics and the environment and its system construction-based on the sustainable development concept. In: *International Journal of Applied Environmental Sciences*. Vol. 8, No.20, S. 2491–2498.
- Tang, S.; Wang, W.; Cho, S.; Yan, H. (2018): Reducing emissions in transportation and inventory management: (R, Q) Policy with considerations of carbon reduction. In: *European Journal of Operational Research*. Vol. 269, No.1, S. 327–340.
- Tavasszy, L. A. (2020): Predicting the effects of logistics innovations on freight systems: Directions for research. In: *Transport Policy*. Vol. 86, S. A1–A6.
- Thematic Research Summary: Freight transport (n.d.): S. 32.
- Toro, E. M.; Franco, J. F.; Echeverri, M. G.; Guimarães, F. G. (2017): A multi-objective model for the green capacitated location-routing problem considering environmental impact. In: *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 110, S. 114–125.
- Transportlogistik: Abenteuer ohne Nebenwirkungen (n.d.): In: LOGISTIK HEUTE. <https://logistik-heute.de/fachmagazin/fachartikel/nachgefragt-seefracht-transportlogistik-abenteuer-ohne-nebenwirkungen-18010.html>. (17.02.2020).
- Tsanakas, N.; Ekström, J.; Olstam, J. (2020): Estimating Emissions from Static Traffic Models: Problems and Solutions. In: *Journal of Advanced Transportations*.
- Ubeda, S.; Arcelus, F. J.; Faulin, J. (2011): Green logistics at Eroski: A case study. In: *International Journal of Production Economics*. Innsbruck 2008. Vol. 131, No.1, S. 44–51.
- UNIMORE (2017): SUCCESS Deliverable 4.3 Simulation results.
- University of Washington (2018): The final 50 feet urban goods delivery system. http://depts.washington.edu/sctlctr/sites/default/files/SCTL_Final_50_full_report.pdf (26.02.2020).
- Urquhart, N.; Hart, E.; Scott, C. (2010): Building low CO2 solutions to the vehicle routing problem with Time Windows using an evolutionary algorithm. In: *In Evolutionary Computation (CEC), 2010 IEEE congress*. S. 1–6.
- Verlinde, S.; Macharis, C.; Milan, L.; Kin, B. (2014): Does a Mobile Depot Make Urban Deliveries Faster, More Sustainable and More Economically Viable: Results of a Pilot Test in Brussels. Vol. 4, S. 361–373.
- Vierth, I.; Karlsson, R.; Linde, T.; Cullinane, K. (2019): How to achieve less emissions from freight transport in Sweden. In: *Maritime Business Review*. Emerald Publishing Limited. Vol. 4, No.1, S. 4–15.
- Voß, P. H.; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (2020): *Logistik - die unterschätzte Zukunftsindustrie: Strategien und Lösungen entlang der Supply Chain 4.0*.
- Wang, J.; Lim, M. K.; Tseng, M.-L.; Yang, Y. (2019): Promoting low carbon agenda in the urban logistics network distribution system. In: *Journal of Cleaner Production*. Vol. 211, S. 146–160.
- WEF (2016): *World Economic Forum White Paper Digital Transformation of Industries: Logistics*. World Economic Forum.
- Weiss, C.; Onnen-Weber, U. (2018): The challenge of sustainable last mile distribution of CEP services in small towns. Vol. 39, S. 594–604.
- Wellbrock, W.; Ludin, D. (2019): *Nachhaltiges Beschaffungsmanagement. Strategien - Praxisbeispiele - Digitalisierung*. Springer, Wiesbaden.
- Wichaisri, S.; Sopadang, A. (2017): Integrating sustainable development, lean, and logistics concepts into a lean sustainable logistics model. In: *International Journal of Logistics Systems and Management*. Vol. 26, No.1, S. 85–104.

- Wildemann, H. (2019): Der Einsatz von Elektromobilität zur Steigerung der Nachhaltigkeit in der Logistik. In: M. SCHRÖDER / K. WEGNER: Logistik im Wandel der Zeit – Von der Produktionssteuerung zu vernetzten Supply Chains. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. S. 719–730.
- Winnes, H.; Styhre, L.; Fridell, E. (2015): Reducing GHG emissions from ships in port areas. In: Research in Transportation Business & Management. Energy Efficiency in Maritime Logistics Chains. Vol. 17, S. 73–82.
- Xiao, Y.; Konak, A. (2017): A genetic algorithm with exact dynamic programming for the green vehicle routing & scheduling problem. In: Journal of Cleaner Production. Vol. 167, S. 1450–1463.
- Yudha, A. K.; Starita, S. (2019): Nighttime Vehicle Routing for Sustainable Urban Logistics. Bangkok.
- Zaman, K.; Shamsuddin, S. (2017): Green logistics and national scale economic indicators: Evidence from a panel of selected European countries. In: Journal of Cleaner Production. Vol. 143, S. 51–63.
- Zhang, J.; Zhao, Y.; Xue, W.; Li, J. (2015): Vehicle routing problem with fuel consumption and carbon emission. In: International Journal of Production Economics. Vol. 170, S. 234–242.
- Zhang, S.; Lee, C. K. M.; Chan, H. K.; Choy, K. L.; Wu, Z. (2015): Swarm intelligence applied in green logistics: A literature review. In: Engineering Applications of Artificial Intelligence. Vol. 37, S. 154–169.
- Zhang, S.; Lee, C. K. M.; Choy, K. L.; Ho, W.; Ip, W. H. (2014): Design and development of a hybrid artificial bee colony algorithm for the environmental vehicle routing problem. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment. Vol. 31, S. 85–99.
- Zhao, X.; Ke, Y.; Zuo, J.; Xiong, W.; Wu, P. (2020): Evaluation of sustainable transport research in 2000–2019. In: Journal of Cleaner Production. Vol. 256.
- Zitzmann, I. (2018): Robust, nachhaltig oder grün? – Was ist „Slow Logistics“? In: Mobility in a Globalised World 2017. University of Bamberg Press.