

**Berechnung und Vergleich spezifischer und allgemeiner
Treibhausgasemissionsfaktoren im Gütertransport am Beispiel
ausgewählter Handelsstrecken**

Vorgelegt von: Carmen Müller

Matrikelnummer: xxx

Studiengang: Internationaler Studiengang Umwelttechnik B.Sc.

Fakultät: Architektur, Bau und Umwelt

Semester: 10. Fachsemester

Erstbetreuer: Prof. Dr. Jürgen Knies

Zweitbetreuerin: Dr. Ayla S. Nawaz

Abgabedatum: 23.06.2023

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht.

Diese Erklärung erstreckt sich auch auf in der Arbeit enthaltene Grafiken, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie auf Quellen aus dem Internet.

Die Arbeit habe ich in gleicher oder ähnlicher Form auch auszugsweise noch nicht als Bestandteil einer Prüfungs- oder Studienleistung vorgelegt.

Ich versichere, dass die eingereichte elektronische Version der Arbeit vollständig mit der Druckversion übereinstimmt.

Leipzig, 23.06.2023

(Ort, Datum)

Carmen Müller

Kurzfassung

In komplexen Lieferketten einen umfassenden Überblick über das tatsächliche Ausmaß von CO₂-Emissionen und anderen Umweltauswirkungen zu erhalten, stellt vor allem große Unternehmen vor eine enorme Herausforderung. Der Transport von Gütern hat dabei einen maßgeblichen Einfluss darauf, wie emissionsstark diese Lieferketten sind. Vor dem Hintergrund der Klimakrise, die es erfordert, in jedem Sektor Klimaschutzmaßnahmen durchzuführen und damit Treibhausgasemissionen zu reduzieren, muss auch die Art des Transports von Gütern hinsichtlich ihrer Klimaschädlichkeit bewertet und daraus positive Veränderungen angestrebt werden. Datenmodelle wie *matter+s* des Unternehmens *ctrl+s GmbH* können die Lieferketten bereits abbilden und diese mit Nachhaltigkeitsindikatoren verknüpfen. Um das Modell *matter+s* hinsichtlich der korrekten Abbildung der Transportemissionen in der Lieferkette weiterzuentwickeln, wurden in der vorliegenden Arbeit zwei für den eurozentrischen Handel repräsentative Handelsrouten ausgewählt, analysiert und die bei dem Transport entstehenden Emissionen berechnet und miteinander verglichen. Die Emissionsberechnung erfolgte dabei auf Grundlage der europäischen Norm DIN EN 16258. Die Ergebnisse bestätigen zum großen Teil das Verhältnis verschiedener Beförderungsmittel bezüglich ihres Emissionsausstoßes, wichtige Erkenntnisse ergaben sich jedoch vor allem im Bereich des Schienengüterverkehrs und im Vergleich der verkehrsmittelübergreifenden Emissionsfaktoren von Kurz- und Langstrecke.

Abstract

Obtaining a comprehensive overview of the actual extent of CO₂ emissions and other environmental impacts in complex supply chains is an enormous challenge, especially for large companies. The transport of goods has a significant influence on how emission-intensive these supply chains are. Against the backdrop of the climate crisis, which requires climate protection measures to be implemented in every sector and thus greenhouse gas emissions to be reduced, the way in which goods are transported must also be assessed in terms of its harmfulness to the climate and positive changes must be sought as a result. Data models such as *matter+s* from the company ctrl+s GmbH can already map the supply chains and link them to sustainability indicators. In order to further develop the *matter+s* model with regard to the correct mapping of transport emissions in the supply chain, two trade routes representative of Eurocentric trade were selected and analysed in the present work, and the emissions generated during transport were calculated and compared with each other. The emission calculation was based on the European standard DIN EN 16258. The results confirm to a large extent the relationship between different means of transport in terms of their emission output, but important findings emerged above all in the area of rail freight transport and in the comparison of the emission factors of short- and long-haul transport across all means of transport.

Inhalt

1	Anlass	1
1.1	<i>Problemstellung</i>	3
1.2	<i>Zielsetzung</i>	3
2	Methodik	5
3	Grundlagen	12
3.1	<i>Stand der Wissenschaft.....</i>	12
3.2	<i>Definitionen</i>	17
3.2.1	Transportlogistik	17
3.2.2	Lieferketten von Unternehmen.....	17
3.2.3	Emissionsfaktoren	17
3.2.4	Spezifische Emissionshöhe	18
3.2.5	Kurz- und Langstrecke	18
3.3	<i>Güterverkehr.....</i>	19
3.3.1	Schiffsverkehr.....	21
3.3.2	Luftfrachtverkehr	22
3.3.3	Straßengüterverkehr	23
3.3.4	Schienengüterverkehr	23
3.4	<i>Emissionsberechnung</i>	25
4	Streckenbeschreibung.....	27
4.1	<i>Langstrecke: Shanghai nach Hamburg</i>	27
4.1.1	Wasserstraße	28
4.1.2	Flugstrecke	31
4.1.3	Straße	33
4.1.4	Schiene	35
4.2	<i>Kurzstrecke: Rotterdam nach Duisburg</i>	39
4.2.1	Wasserstraße	39
4.2.2	Flugstrecke	41
4.2.3	Straße	43
4.2.4	Schiene	44
5	Ergebnisse der Emissionsberechnung.....	46
5.1	<i>Langstrecke: Shanghai nach Hamburg</i>	46

5.1.1	Wasserstraße	46
5.1.2	Luftstrecke.....	47
5.1.3	Straße	48
5.1.4	Schiene	49
5.1.5	Emissionsfaktor nach allgemeiner Transportverteilung auf der Langstrecke	54
5.2	<i>Kurzstrecke: Rotterdam nach Duisburg</i>	55
5.2.1	Wasserstraße	55
5.2.2	Luftstrecke.....	56
5.2.3	Straße	59
5.2.4	Schiene	60
5.2.5	Emissionsfaktor nach allgemeiner Transportverteilung auf der Kurzstrecke	63
6	Auswertung der Ergebnisse	64
6.1	<i>Absolute Treibhausgasemissionen auf der Langstrecke</i>	64
6.2	<i>Spezifische Treibhausgasemissionen auf der Langstrecke</i>	68
6.3	<i>Absolute Treibhausgasemissionen auf der Kurzstrecke</i>	71
6.4	<i>Spezifische Treibhausgasemissionen auf der Kurzstrecke</i>	75
6.5	<i>Vergleich der spezifischen Emissionshöhe zwischen Lang- und Kurzstrecke</i>	78
6.6	<i>Vergleich der allgemeinen Emissionsfaktoren für die Kurz- und Langstrecke</i>	84
7	Diskussion und Ausblick	86
8	Literaturverzeichnis	90
9	Anhang	I

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland, in der Abgrenzung der Sektoren nach dem Klimaschutzgesetz	2
Abbildung 2: Importmengen nach Deutschland aus den EU-Mitgliedstaaten aus dem Jahr 2020	19
Abbildung 3: Importmengen nach Deutschland aus Drittstaaten aus dem Jahr 2020	20
Abbildung 4: Die neue Seidenstraße: Chinas weltweites Infrastruktur-Netzwerk	28
Abbildung 5: Seeweg von Shanghai nach Hamburg.....	29
Abbildung 6: schematische Darstellung des Luftfrachtprozesses in der konventionellen Fracht	32
Abbildung 7: Flugweg von Shanghai (PVG) nach Hamburg (HAM) über Frankfurt am Main (FRA)	32
Abbildung 8: Straßenroute von Shanghai nach Hamburg.....	34
Abbildung 9: Landweg von Shanghai nach Hamburg über den Schienenverkehr	36
Abbildung 10: geplanter Ausbau des 740 Meter-Netzes durch die DB Netz AG bis 2030	37
Abbildung 11: Streckenverlauf auf den Binnenwasserstraßen zwischen dem Hafen Rotterdam und dem Hafen Duisburg.....	40
Abbildung 12: Flugroute zwischen dem Flughafen Amsterdam Schiphol und dem Flughafen Düsseldorf, mit vorgelagertem Straßentransport von Rotterdam nach Amsterdam und nachgelagertem Straßentransport von Düsseldorf nach Duisburg.....	42
Abbildung 13: Straßenverlauf von Rotterdam nach Duisburg	43
Abbildung 14: Landweg von Rotterdam nach Duisburg über den Schienenverkehr	44
Abbildung 15: Vergleich des absoluten CO _{2e} -Ausstoß zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf der Wasserstraße von Shanghai nach Hamburg in Kg CO _{2e}	64
Abbildung 16: Vergleich des absoluten CO _{2e} -Ausstoß zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf der Luftstrecke von Shanghai nach Hamburg in Kg CO _{2e}	65
Abbildung 17: Vergleich des absoluten CO _{2e} -Ausstoß zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf dem Landweg von Shanghai nach Hamburg in Kg CO _{2e}	65
Abbildung 18: Vergleich des absoluten CO _{2e} -Ausstoß zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf der Schienenstrecke von Shanghai nach Hamburg in Kg CO _{2e}	66
Abbildung 19: Vergleich des absoluten CO _{2e} -Ausstoß Tank-to-Wheel zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene in Kg CO _{2e} auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.....	67
Abbildung 20: Vergleich des absoluten CO _{2e} -Ausstoß Well-to-Wheel zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene in Kg CO _{2e} auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.....	67
Abbildung 21: Vergleich der Transportleistung zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene in Tonnenkilometern auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.	68
Abbildung 22: Vergleich der Transportleistung zwischen Luftstrecke, Straße und Schiene in Tonnenkilometern auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.	69

Abbildung 23: Vergleich des CO _{2e} -Ausstoß Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg....	70
Abbildung 24: Vergleich des CO _{2e} -Ausstoß Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg....	70
Abbildung 25: Vergleich des absoluten CO _{2e} -Ausstoß zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf der Wasserstraße von Rotterdam nach Duisburg in Kg CO _{2e}	71
Abbildung 26: Vergleich des absoluten CO _{2e} -Ausstoß zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf der Luftstrecke von Rotterdam nach Duisburg in Kg CO _{2e}	72
Abbildung 27: Vergleich des absoluten CO _{2e} -Ausstoß zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf dem Landweg von Rotterdam nach Duisburg in Kg CO _{2e}	72
Abbildung 28: Vergleich des absoluten CO _{2e} -Ausstoß zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf der Schienenstrecke von Rotterdam nach Duisburg in Kg CO _{2e}	73
Abbildung 29: Vergleich des absoluten CO _{2e} -Ausstoß Tank-to-Wheel zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene in Kg CO _{2e} auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg.....	74
Abbildung 30: Vergleich des absoluten CO _{2e} -Ausstoß Well-to-Wheel zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene in Kg CO _{2e} auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg.....	74
Abbildung 31: Vergleich der Transportleistung zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene in Tonnenkilometern auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg.....	75
Abbildung 32: Vergleich des CO _{2e} -Ausstoß Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg..	76
Abbildung 33: Vergleich des CO _{2e} -Ausstoß Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg..	77
Abbildung 34: Vergleich des CO _{2e} -Ausstoß Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene beider Handelsstrecken.	78
Abbildung 35: Vergleich des CO _{2e} -Ausstoß Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen den Wasserstraßen beider Handelsstrecken.	80
Abbildung 36: Vergleich des CO _{2e} -Ausstoß Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen den Luftstrecken beider Handelsstrecken.....	81
Abbildung 37: Vergleich des CO _{2e} -Ausstoß Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen den Landwegen beider Handelsstrecken.	82
Abbildung 38: Vergleich des CO _{2e} -Ausstoß Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen den Schienenstrecken beider Handelsstrecken.	83
Abbildung 39: Vergleich des allgemeinen Treibhausgasemissionsfaktor der beiden Handelsstrecken.	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2: Arten von Carbon Footprints	12
Tabelle 1: Technische Daten eines 20-Fuß-Containers	21
Tabelle 3: Global Warming Potential relevanter Treibhausgase.....	25
Tabelle 4: schmalste Stellen und Wassertiefen der Häfen Shanghai und Hamburg sowie den Meeresstraßen, die Containerschiffe zwischen Start- und Zielhafen passieren müssen.	30
Tabelle 5: Transportlänge der Schiffsroute sowie Transportkapazität und Antrieb des Containerschiffs auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.....	31
Tabelle 6: Transportlänge der Luftroute sowie Transportkapazität und Antrieb des Frachtflugzeugs auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.	33
Tabelle 7: Transportlänge der Straßenroute sowie Transportkapazität und Antrieb des Lkw auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.	35
Tabelle 8: Transportlänge der Schienenroute sowie Transportkapazität und Antrieb des Güterzugs auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.	37
Tabelle 9: Elektrifizierungsgrad und Anteil an EE am Bahnstrommix in Prozent für die Durchfahrtsländer sowie China und Deutschland.	38
Tabelle 10: Transportlänge der Schiffsroute sowie Transportkapazität und Antrieb des Binnenschiffs auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg.....	41
Tabelle 11: Transportlänge der Flugroute sowie Transportkapazität und Antrieb des Frachtflugzeugs auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg.....	42
Tabelle 12: Transportlänge der Straßenroute sowie Transportkapazität und Antrieb des Lkw auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg.	44
Tabelle 13: Transportlänge, -dauer, durchschnittliche Geschwindigkeit und Transportkapazität der Schienenstrecke zwischen Rotterdam und Duisburg.....	45
Tabelle 14: Elektrifizierungsgrad und Anteil an Erneuerbaren Energien am Bahnstrommix der Staaten Niederlande und Deutschland.....	45
Tabelle 15: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren für ein mit HFO betriebenes Containerschiff auf dem Seeweg von Shanghai nach Hamburg.	46
Tabelle 16: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen für ein HFO-betriebenes Containerschiff auf dem Seeweg von Shanghai nach Hamburg.	46
Tabelle 17: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren für ein mit Kerosin betriebenes Frachtflugzeug auf dem Luftweg von Shanghai nach Hamburg.	47

Tabelle 18: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen für ein kerosinbetriebenes Frachtflugzeug auf dem Luftweg von Shanghai nach Hamburg.....	48
Tabelle 19: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren für ein mit Diesel betriebenen Lkw auf dem Landweg von Shanghai nach Hamburg.....	48
Tabelle 20: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen für einen dieselbetriebenen Lkw auf dem Landweg von Shanghai nach Hamburg.....	49
Tabelle 21: Zusammensetzung des Bahnstrommix in fossile Energieträger, Atomenergie und erneuerbare Energieträger der Länder auf der Langstrecke von Shanghai nach Hamburg in Prozent.	50
Tabelle 22: CO ₂ -Faktoren von Strom aus erneuerbaren Energieträgern, Atomenergie und Strom aus fossilen Energieträgern in Kg CO ₂ /kWh.....	50
Tabelle 23: CO _{2e} -Faktoren des jeweiligen Bahnstrommix für China, Kasachstan, Russland, Belarus, Polen und Deutschland in Kg CO _{2e} /kWh.	51
Tabelle 24: Streckenverteilung der Langstrecke auf die einzelnen Länder mit Angabe der Gesamtlänge pro Strecke und der jeweiligen Teilstreckenlänge pro Land in Kilometern.	51
Tabelle 25: Streckenverteilung der Langstrecke auf die einzelnen Länder mit Angabe des Streckenanteils pro Land in Prozent.....	52
Tabelle 26: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren für einen strombetriebenen Güterzug auf dem Schienenweg von Shanghai nach Hamburg.....	53
Tabelle 27: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen für einen strombetriebenen Güterzug auf dem Schienenweg von Shanghai nach Hamburg.	53
Tabelle 28: Anteil an der Verkehrsleistung der einzelnen Beförderungsmittel für den Import von Gütern aus Drittstaaten nach Deutschland in Prozent.....	54
Tabelle 29: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren für ein mit Diesel betriebenes Binnenschiff auf der Binnenwasserstrecke von Rotterdam nach Duisburg.	55
Tabelle 30: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen für ein dieselbetriebenes Binnenschiff auf der Binnenwasserstrecke von Rotterdam nach Duisburg.	55
Tabelle 31: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren eines mit Kerosin	

betriebenen Frachtflugzeugs im Hauptlauf und eines dieselbetriebenen Lkws im Vor- und Nachlauf auf dem Weg von Rotterdam nach Duisburg.	57
Tabelle 32: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen eines mit Kerosin betriebenen Frachtflugzeugs im Hauptlauf und eines dieselbetriebenen Lkws im Vor- und Nachlauf auf dem Weg von Rotterdam nach Duisburg.	58
Tabelle 33: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren für ein mit Diesel betriebenen Lkw auf dem Landweg von Rotterdam nach Duisburg.	59
Tabelle 34: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen für einen dieselbetriebenen Lkw auf dem Landweg von Rotterdam nach Duisburg.	60
Tabelle 35: Zusammensetzung des Bahnstrommix in fossile Energieträger, Atomenergie und erneuerbare Energieträger der Länder auf der Kurzstrecke von Rotterdam nach Duisburg in Prozent	60
Tabelle 36: CO ₂ -Faktoren des jeweiligen Bahnstrommix für die Niederlande und Deutschland in Kg CO ₂ /kWh.	61
Tabelle 37: Streckenverteilung der Langstrecke auf die einzelnen Länder mit Angabe der Gesamtlänge pro Strecke und der jeweiligen Teilstreckenlänge pro Land in Kilometern.	61
Tabelle 38: Streckenverteilung der Kurz- und Langstrecke auf die einzelnen Länder mit Angabe des Streckenanteils pro Land in Prozent.	61
Tabelle 39: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren für einen strombetriebenen Güterzug auf dem Schienenweg von Rotterdam nach Duisburg.	62
Tabelle 40: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen für einen strombetriebenen Güterzug auf dem Schienenweg von Rotterdam nach Duisburg.	62
Tabelle 41: Anteil an der Verkehrsleistung der einzelnen Beförderungsmittel für den Import von Gütern aus EU-Mitgliedstaaten nach Deutschland in Prozent.	63

Abkürzungsverzeichnis

AMS	Amsterdam Airport Schiphol
B2B	Business to Business
B2C	Business to Customer
C2C	Customer to Customer
CCF	Corporate Carbon Footprint
DEFRA	Department for Environment, Food & Rural Affairs
DSLV	Deutscher Speditions- und Logistikverband
DUS	Flughafen Düsseldorf
DUSS	Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene-Straße
EE	Erneuerbare Energien
ESTEM	Einfache standardisierte Vorgehensweise zur Ermittlung eingesparter THG-Emissionen von Projekten zur Materialeffizienz
FEU	Forty-foot-Equivalent Unit
FRA	Flughafen Frankfurt am Main
GHG Protocol	Greenhouse Gas Protocol
GWP	Global Warming Potential (Treibhausgaspotential)
HAM	Hamburg Helmut Schmidt Flughafen
HFO	heavy fuel oil (Schweröl)
IMO	International Maritime Organization
KEP-Verkehr	Kurier-, Express- und Paketverkehr
KSG	Klimaschutzgesetz
LCA	Life Cycle Assessment
PCF	Product Carbon Footprint
PVG	Shanghai Pudong International Airport
RSC	Rail Service Center Rotterdam
RTM	Rotterdam den Haag Flughafen
StVZO	Straßenverkehrszulassungsordnung
TCF	Transport Carbon Footprint
TEU	Twenty-foot-Equivalent Unit
THG-Emissionen	Treibhausgasemissionen
tkm	Tonnenkilometer
TtW	Tank-to-Wheel
VOS	Vehicle Operating System
WtT	Well-to-Tank
WtW	Well-to-Wheel

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$F(\text{VOS})$	Gesamtkraftstoffverbrauch des Transportmittels	Liter [l]
$f(\text{VOS})$	Spezifischer Kraftstoffverbrauch	Liter pro Kilometer [l/km]
$l_{\text{Transport}}$	Transportlänge	Kilometer [km]
e_t	Tank-to-Wheel Energiefaktor des verwendeten Kraftstoffs	Megajoule pro Liter [MJ/l]
e_w	Well-to-Wheel Energiefaktor des verwendeten Kraftstoffs	Megajoule pro Liter [MJ/l]
g_t	Tank-to-Wheel THG-Emissionsfaktor des verwendeten Kraftstoffs	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente pro Liter [Kg CO _{2e} /l]
g_w	Well-to-Wheel THG-Emissionsfaktor des verwendeten Kraftstoffs	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente pro Liter [Kg CO _{2e} /l]
E_t	Tank-to-Wheel Energieverbrauch des Transports	Megajoule [MJ]
E_w	Well-to-Wheel Energieverbrauch des Transports	Megajoule [MJ]
G_t	Tank-to-Wheel Emissionen des Transports	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente [Kg CO _{2e}]
G_w	Well-to-Wheel Emissionen des Transports	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente [Kg CO _{2e}]
T	Transportleistung des Beförderungsmittels	Tonnenkilometer [tkm]
$k_{\text{Transport}}$	Transportkapazität des Beförderungsmittels	Tonnen [t]
$l_{\text{Transport}}$	Transportlänge	Kilometer [km]
$E_t(T)$	Tank-to-Wheel Energieverbrauch des Transports pro tkm	Megajoule pro Tonnenkilometer [MJ/tkm]
$E_w(T)$	Well-to-Wheel Energieverbrauch des Transports pro Tonnenkilometer	Megajoule pro Tonnenkilometer [MJ/tkm]
$G_t(T)$	Tank-to-Wheel Emissionen des Transports pro Tonnenkilometer	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente pro Tonnenkilometer [Kg CO _{2e} /tkm]
$G_w(T)$	Well-to-Wheel Emissionen des Transports pro Tonnenkilometer	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente pro Tonnenkilometer [Kg CO _{2e} /tkm]
$g_{w, \text{Land}}$	Allgemeiner CO _{2e} -Faktor für den Bahnstrommix eines Landes	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente pro Kilowattstunde [Kg CO _{2e} /kWh]
$g_{w, \text{fossil}}$	CO _{2e} -Faktor für Strom aus fossilen Energieträgern	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente pro Kilowattstunde [Kg CO _{2e} /kWh]

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$g_{w, \text{nuklear}}$	CO _{2e} -Faktor für Strom aus Nuklearenergie	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente pro Kilowattstunde [Kg CO _{2e} /kWh]
$g_{w, \text{eel}}$	CO _{2e} -Faktor für Strom aus erneuerbaren Energieträgern	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente pro Kilowattstunde [Kg CO _{2e} /kWh]
x_{fossil}	Anteil an fossilen Energieträgern am Bahnstrommix	-
x_{nuklear}	Anteil an Nuklearenergie am Bahnstrommix	-
x_{ee}	Anteil an erneuerbaren Energieträgern am Bahnstrommix	-
$g_{w, \text{Strecke}}$	Allgemeiner CO _{2e} -Faktor der gesamten Bahnstrecke	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente pro Kilowattstunde [Kg CO _{2e} /kWh]
$g_{w, \text{Start}}$	Allgemeiner CO _{2e} -Faktor für den Bahnstrommix des Startlandes	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente pro Kilowattstunde [Kg CO _{2e} /kWh]
$g_{w, \text{Land } i}$	Allgemeiner CO _{2e} -Faktor für den Bahnstrommix eines Durchfahrtslandes i	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente pro Kilowattstunde [Kg CO _{2e} /kWh]
$g_{w, \text{Ziel}}$	Allgemeiner CO _{2e} -Faktor für den Bahnstrommix des Ziellandes	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente pro Kilowattstunde [Kg CO _{2e} /kWh]
x_{Start}	Streckenanteil des Startlandes an gesamter Streckenlänge	-
$x_{\text{Land } i}$	Streckenanteil eines Durchfahrtslandes i an gesamter Streckenlänge	-
x_{Ziel}	Streckenanteil des Ziellandes an gesamter Streckenlänge	-
$G_{w, \text{allg}} (T)$	Allgemeiner CO _{2e} -Faktor der Strecke nach Verkehrsträgeranteil	Gramm CO ₂ -Äquivalente pro Tonnenkilometer [Kg CO _{2e} /tkm]
$G_{w, \text{Schiff}} (T)$	CO _{2e} -Faktor für die Schifffahrt	Gramm CO ₂ -Äquivalente pro Tonnenkilometer [Kg CO _{2e} /tkm]
$G_{w, \text{Flug}} (T)$	CO _{2e} -Faktor für den Luftweg	Gramm CO ₂ -Äquivalente pro Tonnenkilometer [Kg CO _{2e} /tkm]
$G_{w, \text{Lkw}} (T)$	CO _{2e} -Faktor für die Straße	Gramm CO ₂ -Äquivalente pro Tonnenkilometer [Kg CO _{2e} /tkm]
$G_{w, \text{Schiene}} (T)$	CO _{2e} -Faktor für die Schiene	Gramm CO ₂ -Äquivalente pro Tonnenkilometer [Kg CO _{2e} /tkm]

Symbol	Bezeichnung	Einheit
X_{Schiff}	Anteil des Schiffstransports an Verkehrsleistung im Import nach Deutschland	-
X_{Flug}	Anteil des Flugzeugtransports an Verkehrsleistung im Import nach Deutschland	-
X_{Lkw}	Anteil des Lkw-Transports an Verkehrsleistung im Import nach Deutschland	-
X_{Schiene}	Anteil des Güterzugtransports an Verkehrsleistung im Import nach Deutschland	-

Regelwerke, Richtlinien und Gesetze

Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist

DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020) vom 21. September 2020

ISO 14083: Treibhausgase - Quantifizierung und Berichterstattung über Treibhausgasemissionen von Transportvorgängen (ISO 14083:2023(E)) vom 20. März 2023

DIN EN 16258: Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr) (DIN EN 16258:2012) vom 08. September 2012

Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 26. April 2012 (BGBl. I S. 679), die zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 12. Juli 2021 (BGBl. I S. 3091) geändert worden ist

1 Anlass

Die globale Erwärmung ist eine Krise, die auf allen Ebenen Einsatz und Veränderungen fordert. Um diese Krise bewältigen oder zumindest soweit wie möglich abzumildern, ist die Verringerung der Treibhausgasemissionen ein weltweit definiertes Ziel der internationalen Klimapolitik, mit dem die globale Erwärmung bis zum Jahr 2100 auf weniger als zwei Grad Celsius im Vergleich zum Stand vor Beginn der Industrialisierung begrenzt werden soll. Damit dieses Ziel erreicht werden kann, wurde im Pariser Abkommen 2015 festgelegt, dass alle unterzeichnenden Staaten innerhalb der zweiten Hälfte des Jahrhunderts Treibhausgasneutralität erreichen müssen (Umweltbundesamt, 2021a). Das Ziel der Europäischen Union zur Einhaltung des Pariser Abkommens ist die Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050 (Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, 2023; Umweltbundesamt, 2022a); nach dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) soll Deutschland bereits zum Jahr 2045 treibhausgasneutral werden, was laut Umweltbundesamt (2022) eine vollständige Senkung der Treibhausgasemissionen auf Null im Verkehrssektor entspricht. Bislang zeigt sich jedoch, dass der Verkehrssektor gegenüber den anderen Sektoren des KSG mit minus neun Prozent den geringsten Rückgang an Treibhausgasemissionen zwischen 1990 und 2021 zu verzeichnen hat (Umweltbundesamt, 2022b). Auch über die letzten zwölf Jahre hinweg zeigte sich im Verkehr eine Stagnation in der Höhe des Treibhausgasausstoßes. Die ausgestoßene Menge an Treibhausgasen überstieg zusätzlich den nach KSG für das Jahr 2021 zulässigen Treibhausgasausstoß von 145 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten um 3 Millionen Tonnen (Umweltbundesamt, 2022c). Die Entwicklung lässt sich aus Abbildung 1 entnehmen.

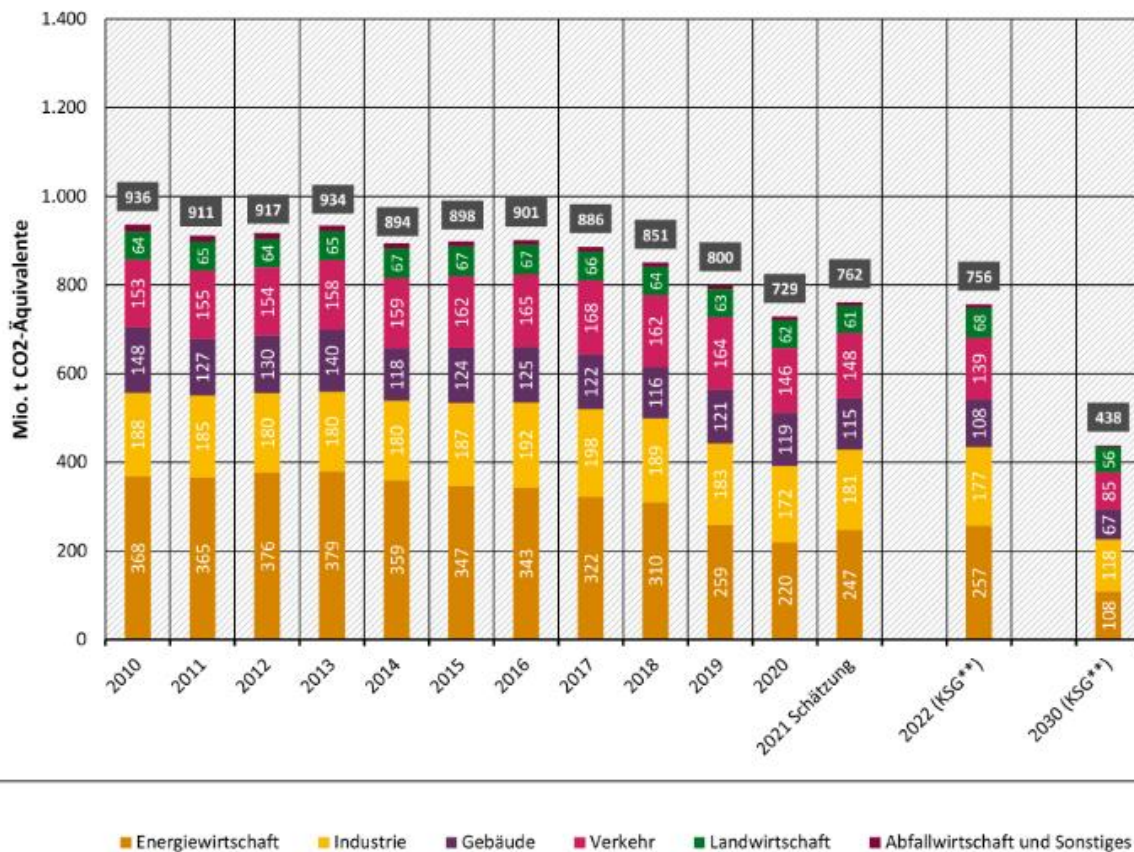


Abbildung 1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland, in der Abgrenzung der Sektoren nach dem Klimaschutzgesetz. Quelle: (Umweltbundesamt, 2022c)

Laut Umweltbundesamt (2022c) ist ein Grund für den Anstieg im Jahr 2021 ein gestiegenes Verkehrsaufkommen im Straßengüterverkehr im Vergleich zum Jahr 2020. Es wird ersichtlich, dass es für eine nachhaltige Entwicklung nicht nur einen gesellschaftlichen und politischen, sondern auch einen wirtschaftlichen Wandel benötigt. Daher werden auch Unternehmen immer stärker dazu aufgefordert, selbst Strategien zur Erreichung der Treibhausgasneutralität zu entwickeln und dabei die Verantwortung nicht nur für ihren eigenen Geschäftsbereich, sondern auch in ihrer gesamten Lieferkette zu übernehmen (vgl. (Deckert, 2021, S. 103). Für Unternehmen ist es daher essentiell, selbst genaue Kenntnis über die Risiken in ihrem Geschäftsbetrieb und ihrer Lieferkette zu haben, beispielsweise evaluieren zu können, wie hoch ihre Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) sind, wie viel Abfall erzeugt oder wie hoch der Wasserverbrauch durch das Unternehmensgeschäft ist. Nur so können Unternehmen einerseits sinnvolle Maßnahmen vornehmen, um den Umweltauswirkungen entgegenzuwirken, und damit andererseits langfristig konkurrenzfähig im jeweiligen Geschäftsbereich bleiben und auf Regelungen zukünftiger Klimapolitik reagieren zu können (World Business Council for Sustainable Development & World Resources Institute, 2004, S. 3).

Eine große Herausforderung ist dabei die Logistik der Lieferkette: „Das zukünftige Überschreiten des Ölfördermaximums und die dadurch zu erwartenden Kostensteigerungen werden maßgeblichen

Einfluss auf die Gestaltung internationaler Transportketten haben“ (Baumgarten, 2008). Es werden Veränderungen in der Wahl von Transportmitteln stattfinden müssen; gleichzeitig müssen Energieeffizienz und neue Technologien weiter ausgebaut werden. Allgemein stehen Logistikunternehmen vor der Herausforderung, ressourcen- und umweltschonender in ihren Prozessen zu agieren (Baumgarten, 2008, S. 18) (Deckert, 2021, 66, 67).

1.1 Problemstellung

In komplexen Lieferketten einen umfassenden Überblick über das tatsächliche Ausmaß von CO₂-Emissionen und anderen Umweltauswirkungen zu erhalten, stellt vor allem große Unternehmen vor eine enorme Herausforderung. Das im Februar 2022 gegründete Unternehmen ctrl+s GmbH aus Berlin hat es sich deshalb zur Aufgabe gemacht, das Datenmodell *matter+s* zu entwickeln, welches in der Lage ist, Lieferketten mit teils Tausenden von Zulieferern abzubilden und daraus THG-Emissionen, Abfallaufkommen, Wasserverbrauch und zukünftig noch weitere Nachhaltigkeitsindikatoren abzuleiten und damit Unternehmen diese Aufgabe abzunehmen. Das Modell befindet sich in ständiger Weiterentwicklung, damit die daraus erzielten Ergebnisse immer präziser werden. Die Vorgehensweise des Unternehmens liegt darin, den Genauigkeitsgrad durch einen iterativen Prozess ständig zu erhöhen, um letztendlich reale Gegebenheiten so genau wie möglich abbilden zu können. Eine bislang noch nicht gelöste Problematik ist dabei unter anderem die Berechnung der Transportemissionen von Gütern innerhalb der Lieferkette. Um das Modell hinsichtlich der korrekten Abbildung der Transportemissionen in der Lieferkette weiterzuentwickeln, soll sich die vorliegende Arbeit mit ausgewählten Handelsrouten und den jeweiligen Beförderungsmitteln beschäftigen und Emissionsberechnungen durchführen, um eine Grundlage für die zukünftige quantitative Emissionsberechnung im *matter+s* Modell zu bilden.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Bachelorarbeit soll sein, auf qualitativer Ebene zwei für den eurozentrischen Welthandel repräsentative Handelsrouten auszuwählen, zu analysieren und die bei dem Transport entstehenden Emissionen zu berechnen. Es werden die Verkehrsträger Überseeschiff, Binnenschiff, Frachtflugzeug, Lastkraftwagen und Güterzug betrachtet. Die vorliegende Arbeit bezieht sich auf den Containertransport als Güterart.

Darauf aufbauend sollen die Emissionen der Kurz- und Langstrecke miteinander verglichen werden, um mögliche Unterschiede aufzudecken. Weiterhin soll jeweils ein allgemeiner Emissionsfaktor aus dem aktuellen Stand der Transportverteilung auf Kurz- und Langstrecken entwickelt werden, um diese ebenfalls miteinander vergleichen zu können.

Im Speziellen sollen folgende Fragestellungen bearbeitet werden:

- 1) Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede lassen sich anhand der Berechnung und dem Vergleich spezifischer und allgemeiner Treibhausgasemissionsfaktoren im Gütertransport auf Grundlage der DIN EN 16258 auf einer innereuropäischen und einer transkontinentalen Handelsstrecke des 21. Jahrhundert feststellen?
- 2) Welchen Einfluss hat die derzeitige Transportmittelverteilung von Importen nach Deutschland je nach Exportland auf die Höhe der allgemeinen Treibhausgasemissionsfaktoren für die innereuropäische und die transkontinentale Handelsstrecke und welche Unterschiede lassen sich anhand der Berechnung dieser beiden Emissionsfaktoren feststellen?
- 3) Wie groß ist der Einfluss des derzeitigen jeweiligen Strommix aller Durchfahrtsländer der betrachteten Handelsstrecken auf die Höhe der Treibhausgasemissionen im Schienengüterverkehr und welche Auswirkungen haben diese auf die Bewertung des Schienengüterverkehrs im Vergleich zum Schiffs-, Flug- und Straßengüterverkehr hinsichtlich der spezifischen Treibhausgasemissionshöhe?

2 Methodik

Um die übergreifende Fragestellung der vorliegenden Arbeit nach der Feststellung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden anhand der Berechnung und dem Vergleich spezifischer und allgemeiner Treibhausgasemissionsfaktoren im Gütertransport auf einer innereuropäischen und einer transkontinentalen Handelsstrecke des 21. Jahrhundert zu beantworten, wurde zu Beginn eine Kurzstrecke im innereuropäischen Kontext sowie eine interkontinentale Langstrecke festgelegt. Kriterien für die Wahl der Handelsstrecken waren zum einen die wirtschaftliche Relevanz für den deutschen Markt, für welche die Betrachtung deutscher Außenhandelsstatistiken die Grundlage bot; zum anderen sollten beide Handelsstrecken jeweils möglichst alle Verkehrsträger abdecken können, folglich Zugang zu Wasserstraßen und dem Schienenverkehr bieten sowie den Flug- und Straßenverkehr ermöglichen.

Die beiden Handelsrouten werden zunächst geographisch beschrieben. Die potenziellen Einschränkungen, die aufgrund der Streckenbedingungen erfolgen können, wirken sich auf einen oder mehrere der Parameter aus, welche die Transportmittel charakterisieren sollen: Transportlänge, Transportdauer und Transportkapazität. Auf Grundlage der vorangegangenen Transportmittelbetrachtung erfolgt anschließend die Emissionsberechnung der Kurz- und Langstrecke nach Beförderungsweg bzw. Transportträger. Um die Emissionsberechnung durchführen zu können, wurden zunächst Daten zu spezifischen Kraftstoffverbräuchen in Liter Kraftstoff pro Kilometer recherchiert. Hierbei sollten die Daten möglichst aktuell sein. Es wurden daher Datenquellen aus den Jahren zwischen 2013 und 2022 in der Arbeit verwendet. Die Emissionsberechnung erfolgt auf Grundlage der in Deutschland als auch in gesamt Europa gültigen Norm zur Standardisierung des CO₂-Fußabdrucks im Transportwesen DIN EN 16258. Sie bestimmt die Methodik und Anforderungen zur Berechnung und Berichterstattung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen. Inhalt und Struktur der Norm sollen allgemein auf den Verkehrssektor, einschließlich aller Verkehrsträger, anwendbar und einer breiten Nutzergruppe zugänglich sein. Die Berechnung der THG-Emissionen umfasst nach Einhaltung des Kyoto-Protokolls folgende sechs Gase: Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), Fluorkohlenwasserstoff (PFC), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW), Fluorkohlenwasserstoff (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF₆). Durch die DIN EN 16258 sind bestimmte Systemgrenzen für die Emissionsberechnung vorgeschrieben. Prozesse, die in der Berechnung enthalten sind, stellen zum einen die fahrzeugbezogenen Betriebsprozesse als auch die Energiebetriebsprozesse dar, die während der Betriebsphase des Lebenszyklus auftreten. Die Fahrzeugbetriebsprozesse beinhalten dabei alle Tank-to-Wheel Vorgänge, in der wörtlichen Übersetzung von Tank zum Reifen. Diese umfassen jene Prozesse, die in einem Fahrzeug während seines Betriebs ablaufen, einschließlich Antriebs- und Hilfsdienste wie Hauptmotoren, Zusatzausrüstung zur Aufrechterhaltung der Temperatur des

Laderaums sowie Umschlag- oder Umschlageinrichtungen an Bord. Die betrieblichen Energieprozesse bilden hingegen alle Well-to-Tank Vorgänge (vom Bohrloch zum Tank). Diese reichen bei Kraftstoffen von der Gewinnung oder dem Anbau der Primärenergie über Raffination, Umwandlung, Transport und Verteilung von Energie in allen Phasen der Herstellung des verwendeten Brennstoffs bis hin zur Stromerzeugung und Verlusten in Stromnetzen. Die Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen werden daher entweder nur direkt (Tank-to-Wheel) ermittelt, oder ganzheitlich (Well-to-Wheel).

Im Rahmen der Berechnung von Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor sind jedoch bestimmte Prozesse von der Erfassung ausgeschlossen. Dazu gehören direkte THG-Emissionen, die aufgrund von Leckagen von Kältemittelgas oder Erdgas entstehen. Auch zusätzliche Auswirkungen der Verbrennung von Flugbenzin in großer Höhe, wie Kondensstreifen, sind nicht berücksichtigt. Weitere Prozesse, die nicht einbezogen werden, sind kurzfristige Unterstützungsmaßnahmen für Fahrzeuge aus Sicherheits- oder Bewegungsgründen. Hierzu zählen zum Beispiel Schlepper für den Schiffstransport in Häfen oder Flugzeugschlepper auf Flughäfen. Ebenfalls nicht in der Berechnung erfasst werden Prozesse, die durch externe Umschlageinrichtungen für Fracht oder durch externe Bewegungsvorrichtungen für Fahrgäste wie Aufzüge und Fahrsteige entstehen. In diesem Zusammenhang gehören auch Vorgänge innerhalb von Plattformen von Expresslieferdiensten und anderen transportorganisierten Diensten, wie das Be- und Entladen von Paketen oder Paletten, zu dieser Kategorie von Prozessen. Administrative Prozesse der am Verkehr beteiligten Organisationen sind ebenfalls von der Berechnung ausgeschlossen. Hierzu zählen unter anderem der Betrieb von Gebäuden, das Pendeln des Personals und Geschäftsreisen sowie der Betrieb von Computersystemen. Auch Verfahren für den Bau, die Wartung und die Verschrottung von Fahrzeugen sowie Prozesse im Zusammenhang mit dem Bau, der Instandhaltung und dem Rückbau von Verkehrsinfrastrukturen, die von Fahrzeugen genutzt werden, sind nicht einbezogen. Schließlich sind auch nicht betriebsbereite Energieprozesse, wie die Herstellung oder der Bau von Förderanlagen, Transport- und Verteilungssystemen, Raffinerien, Anreicherungsanlagen, Energieerzeugungsanlagen etc. zur Wiederverwendung, Wiederverwertung und Verschrottung von der Berechnung ausgenommen. Darüber hinaus werden eventuelle Klimaschutzmaßnahmen wie CO₂-Kompensationsprojekte oder politische Maßnahmen wie den Emissionshandel ebenfalls nicht in die Berechnungen miteinbezogen.

Das Ziel der Berechnung besteht letztendlich darin, das Ergebnis von vier verschiedenen Angaben zu ermitteln. Hierzu zählen der Well-to-Wheel Energieverbrauch (E_w), die Well-to-Wheel Treibhausgasemissionen (G_w), der Tank-to-Wheel Energieverbrauch (E_t) sowie die Tank-to-Wheel Treibhausgasemissionen (G_t). Dazu muss zunächst der Gesamtkraftstoffverbrauch $F(VOS)$ des Fahrzeugeinsatzsystems ($VOS = \text{Vehicle Operating System}$) berechnet werden. Diesen Wert erhält man, indem der spezifische Kraftstoffverbrauch in Litern Kraftstoff pro Kilometer Fahrweg mit der Transportlänge multipliziert wird (vgl. Gleichung [1]).

$$F(VOS) = f(VOS) * l_{Transport} \quad [1]$$

Mit: $F(VOS)$ = Gesamtkraftstoffverbrauch des Transportmittels [l]
 $f(VOS)$ = Spezifischer Kraftstoffverbrauch [l/km]
 $l_{Transport}$ = Transportlänge [km]

Mit Erhalt des Gesamtkraftstoffverbrauchs können anschließend die Energieverbräuche sowie die Treibhausgasemissionen ermittelt werden. Hierzu werden Energie- und Treibhausgasemissionsfaktoren für den betrachteten Energieträger herangezogen, die aus Anhang A, Tabelle A.1 der DIN EN 16258 entnommen werden. Die Gleichungen [2], [3], [4] und [5] zeigen den jeweiligen Rechenweg.

Energieverbrauch Tank-to-Wheel

$$E_t (VOS) = F(VOS) * e_t \quad [2]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel:

$$E_w (VOS) = F(VOS) * e_w \quad [3]$$

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel

$$G_t (VOS) = F(VOS) * g_t \quad [4]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel

$$G_w (VOS) = F(VOS) * g_w \quad [5]$$

Mit: $F(VOS)$ = Gesamtkraftstoffverbrauch des Transportmittels [l]
 e_t = Tank-to-Wheel Energiefaktor des verwendeten Kraftstoffs [MJ/l]
 e_w = Well-to-Wheel Energiefaktor des verwendeten Kraftstoffs [MJ/l]
 g_t = Tank-to-Wheel THG Emissionsfaktor des verwendeten Kraftstoffs [Kg CO_{2e}/l]
 g_w = Well-to-Wheel THG Emissionsfaktor des verwendeten Kraftstoffs [Kg CO_{2e}/l]
 E_t = Tank-to-Wheel Energieverbrauch des Transports [MJ]
 E_w = Well-to-Wheel Energieverbrauch des Transports [MJ]
 G_t = Tank-to-Wheel Emissionen des Transports [Kg CO_{2e}]
 G_w = Well-to-Wheel Emissionen des Transports [Kg CO_{2e}]

Um letztendlich einen Vergleich zwischen verschiedenen Beförderungsmitteln herstellen zu können, werden die Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen mit der Transportleistung, demnach der Beförderung von Gütern pro Tonne und Kilometer zurückgelegter Strecke in Verhältnis zueinander gesetzt. Mit Gleichung [6] lässt sich die Transportleistung ermitteln.

$$T = k_{Transport} * l_{Transport} \quad [6]$$

Mit:

$$T = \text{Transportleistung des Beförderungsmittels [tkm]}$$

$$k_{Transport} = \text{Transportkapazität des Beförderungsmittels [t]}$$

$$l_{Transport} = \text{Transportlänge [km]}$$

Mit der Transportleistung als Quotienten erhält man abschließend die spezifischen Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen pro Tonnenkilometer (vgl. Gleichung [7], [8], [9] und [10]).

Energieverbrauch Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$E_t(T) = \frac{E_t(VOS)}{T} \quad [7]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$E_w(T) = \frac{E_w(VOS)}{T} \quad [8]$$

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_t(T) = \frac{G_t(VOS)}{T} \quad [9]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_w(T) = \frac{G_w(VOS)}{T} \quad [10]$$

Mit:

$$T = \text{Transportleistung des Beförderungsmittels [tkm]}$$

$$E_t = \text{Tank-to-Wheel Energieverbrauch des Transports [MJ]}$$

$$E_w = \text{Well-to-Wheel Energieverbrauch des Transports [MJ]}$$

$$G_t = \text{Tank-to-Wheel Emissionen des Transports [Kg CO}_{2e}\text{]}$$

$$G_w = \text{Well-to-Wheel Emissionen des Transports [Kg CO}_{2e}\text{]}$$

$$E_t(T) = \text{Tank-to-Wheel Energieverbrauch des Transports pro tkm [MJ/tkm]}$$

$$\begin{aligned}
 E_w(T) &= \text{Well-to-Wheel Energieverbrauch des Transports pro} \\
 &\quad \text{Tonnenkilometer [MJ/tkm]} \\
 G_t(T) &= \text{Tank-to-Wheel Emissionen des Transports pro} \\
 &\quad \text{Tonnenkilometer [Kg CO}_{2e}\text{/tkm]} \\
 G_w(T) &= \text{Well-to-Wheel Emissionen des Transports pro} \\
 &\quad \text{Tonnenkilometer [Kg CO}_{2e}\text{/tkm]}
 \end{aligned}$$

Schließlich soll ein Vergleich des CO_{2e}-Ausstoßes pro Tonnenkilometer (tkm) der jeweiligen Transportmittel zwischen Lang- und Kurzstrecke stattfinden, sowie ein Vergleich der beiden allgemeinen Emissionsfaktoren miteinander.

Die allgemeinen Emissionsfaktoren werden dabei in der zweiten Fragestellung näher untersucht. Hier wird der Einfluss der derzeitigen Transportmittelverteilung von Importen nach Deutschland je nach Exportland auf die Höhe der allgemeinen Treibhausgasemissionsfaktoren für die beiden Handelsstrecken und den Unterschieden zwischen den zugehörigen Emissionsfaktoren beleuchtet, in dem zunächst die beiden allgemeinen Emissionsfaktoren nach folgender Herangehensweise berechnet werden: Unter Berücksichtigung der Zusammensetzung von Beförderungsmitteln an der Verkehrsleistung von Importgütern lässt sich aus den Treibhausgasemissionsfaktoren der einzelnen Beförderungsmittel ein allgemeiner Faktor für die Kurzstrecke sowie für die Langstrecke entwickeln. Für die Kurzstrecke wird dabei die Transportmittelverteilung von Importen aus EU-Mitgliedstaaten herangezogen, für die Langstrecke die Transportmittelverteilung von Importen aus Drittstaaten. Mit Kenntnis der Transportmittelverteilung werden die Anteile der Verkehrsträger mit ihrem CO_{2e}-Faktor für die jeweilige Strecke multipliziert und die Faktoren miteinander addiert. Dieser Vorgang (siehe Gleichung [11]) resultiert im allgemeinen Emissionsfaktor der betrachteten Strecke.

$$\begin{aligned}
 G_{w,allg}(T) &= (x_{Schiff} * G_{w,Schiff}(T)) + (x_{Flug} * G_{w,Flug}(T)) + (x_{Lkw} * G_{w,Lkw}(T)) \\
 &\quad + (x_{Schiene} * G_{w,Schiene}(T)) \quad [11]
 \end{aligned}$$

Mit:

$$\begin{aligned}
 G_{w,allg}(T) &= \text{Allgemeiner CO}_{2e}\text{-Faktor der Strecke nach} \\
 &\quad \text{Verkehrsträgeranteil [g CO}_{2e}\text{/tkm]} \\
 G_{w,Schiff}(T) &= \text{CO}_{2e}\text{-Faktor für die Schifffahrt [g CO}_{2e}\text{/tkm]} \\
 G_{w,Flug}(T) &= \text{CO}_{2e}\text{-Faktor für den Luftweg [g CO}_{2e}\text{/tkm]} \\
 G_{w,Lkw}(T) &= \text{CO}_{2e}\text{-Faktor für die Straße [g CO}_{2e}\text{/tkm]} \\
 G_{w,Schiene}(T) &= \text{CO}_{2e}\text{-Faktor für die Schiene [g CO}_{2e}\text{/tkm]} \\
 x_{Schiff} &= \text{Anteil des Schiffstransports an Verkehrsleistung im Import} \\
 &\quad \text{nach Deutschland} \\
 x_{Flug} &= \text{Anteil des Flugzeugtransports an Verkehrsleistung im} \\
 &\quad \text{Import nach Deutschland}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_{Lkw} &= \text{Anteil des Lkw-Transports an Verkehrsleistung im Import} \\
 &\quad \text{nach Deutschland} \\
 x_{Schiene} &= \text{Anteil des Güterzugtransports an Verkehrsleistung im} \\
 &\quad \text{Import nach Deutschland}
 \end{aligned}$$

Unter Einbezug der spezifischen Emissionsfaktoren der jeweiligen Beförderungsmittel zeigt sich mit dem dominierenden Verkehrsträger eine Tendenz für die Höhe des allgemeinen Emissionsfaktors einer Handelsstrecke. Im weiteren Verlauf können die beiden ermittelten Emissionsfaktoren von Kurz- und Langstrecke miteinander verglichen und somit mögliche Unterschiede festgestellt werden. Zusätzlich kann durch den Vergleich beider Faktoren der Einfluss der Transportmittelverteilung bewertet werden.

Um die Fragestellung der Höhe des Einflusses des derzeitigen jeweiligen Strommix aller Länder der betrachteten Handelsstrecken auf die Höhe der Treibhausgasemissionen im Schienengüterverkehr und den Auswirkungen auf die Bewertung des Schienengüterverkehrs im Vergleich zum Schiffs-, Flug- und Straßengüterverkehr hinsichtlich der spezifischen Treibhausgasemissionshöhe beantworten zu können, muss nach einer von den übrigen Verkehrsträgern abweichende Methodik vorgegangen werden. Anders als bei den anderen betrachteten Treibstoffen, werden der spezifische Kraftstoffverbrauch sowie die Energie- und Treibhausgasemissionsfaktoren bei elektrisch betriebenem Schienengüterverkehr nicht pro Liter, sondern pro Kilowattstunde angegeben. Darüber hinaus enthält die DIN EN 16258 im Gegensatz zu den übrigen hier betrachteten Beförderungsmittel keine Angaben für den Well-to-Wheel Treibhausgasemissionsfaktor von strombetriebenen Transportmitteln. Dies ist auch nicht möglich, da dieser Wert abhängig von den Energieträgern ist, mit welchen der Strom erzeugt und bereitgestellt wird. Bei nationalem Schienenverkehr müsste demnach der länderspezifische Strommix mit dem dazugehörigen Emissionsfaktor betrachtet werden, der für die elektrisch betriebenen Eisenbahnen bereitgestellt wird. Da in der vorliegenden Arbeit jedoch zwei internationale Routen betrachtet werden, muss zunächst für jedes Land, durch das die Schienenstrecke führt bzw. startet und endet, der jeweilige Bahnstrommix ermittelt werden. Um aus diesen Daten anschließend Treibhausgasemissionsfaktoren zu berechnen, müssen die CO_{2e}-Faktoren der vorkommenden Energieträger recherchiert werden. Im nächsten Schritt werden die Anteile der Energieträger mit ihrem CO_{2e}-Faktor multipliziert und die Faktoren miteinander addiert. Durch diesen Vorgang (siehe Gleichung [12]) werden die Emissionsfaktoren für den jeweiligen Strommix der einzelnen Länder ermittelt.

$$g_{w,Land} = (x_{fossil} * g_{w,fossil}) + (x_{nuklear} * g_{w,nuklear}) + (x_{ee} * g_{w,ee}) \quad [12]$$

Mit:	$g_{w, Land}$	=	Allgemeiner CO_{2e} -Faktor für den Bahnstrommix eines Landes [Kg CO_{2e}/kWh]
	$g_{w, fossil}$	=	CO_{2e} -Faktor für Strom aus fossilen Energieträgern [Kg CO_{2e}/kWh]
	$g_{w, nuklear}$	=	CO_{2e} -Faktor für Strom aus Nuklearenergie [Kg CO_{2e}/kWh]
	$g_{w, eel}$	=	CO_{2e} -Faktor für Strom aus erneuerbaren Energieträgern [Kg CO_{2e}/kWh]
	x_{fossil}	=	Anteil an fossilen Energieträgern am Bahnstrommix
	$x_{nuklear}$	=	Anteil an Nuklearenergie am Bahnstrommix
	x_{eel}	=	Anteil an erneuerbaren Energieträgern am Bahnstrommix

Sind die Emissionsfaktoren pro Land bekannt, genügt es nicht, lediglich den Durchschnitt dieser zu berechnen, da sich die einzelnen Teilstrecken nicht gleichmäßig auf jedes Land verteilen. Daher muss die Streckenverteilung auf die Länder betrachtet werden, um den Streckenanteil eines Landes abschließend mit dem entsprechenden CO_{2e} -Emissionsfaktor in Verbindung zu bringen. Die Streckenverteilung wird mit der OpenSource Webanwendung BRouter nach Brenschede (2013) ermittelt. Gleichung [13] zeigt den anschließend erfolgenden Rechenweg auf. Das Ergebnis ist der gesuchte Treibhausgasemissionsfaktor für die gesamte betrachtete Strecke.

$$g_{w,Strecke} = (x_{Start} * g_{w,Start}) + (x_{Land i} * g_{w,Land i}) + (...) + (x_{Ziel} * g_{w,Ziel}) \quad [13]$$

Mit:	$g_{w, Strecke}$	=	Allgemeiner CO_{2e} -Faktor der gesamten Bahnstrecke [Kg CO_{2e}/kWh]
	$g_{w, Start}$	=	Allgemeiner CO_{2e} -Faktor für den Bahnstrommix des Startlandes [Kg CO_{2e}/kWh]
	$g_{w, Land i}$	=	Allgemeiner CO_{2e} -Faktor für den Bahnstrommix eines Durchfahrtslandes i [Kg CO_{2e}/kWh]
	$g_{w, Ziel}$	=	Allgemeiner CO_{2e} -Faktor für den Bahnstrommix des Ziellandes [Kg CO_{2e}/kWh]
	x_{Start}	=	Streckenanteil des Startlandes an gesamter Streckenlänge
	$x_{Land i}$	=	Streckenanteil eines Durchfahrtslandes i an gesamter Streckenlänge
	x_{Ziel}	=	Streckenanteil des Ziellandes an gesamter Streckenlänge

Die methodische Vorgehensweise verdeutlicht bereits, dass der errechnete Emissionsfaktor pro Strecke unterschiedlich hoch ausfällt, je nachdem, welcher Bahnstrommix den Streckenabschnitten zugrunde liegt. Die Treibhausgasemissionsfaktoren der beiden Handelsstrecken im Schienengüterverkehr werden miteinander verglichen, um durch die Differenz die Höhe des Einflusses festzustellen. Abschließend werden alle spezifischen Emissionsfaktoren der Beförderungsmittel betrachtet und in Verhältnis zueinander gesetzt.

3 Grundlagen

3.1 Stand der Wissenschaft

Das Motiv für die Berechnung von Treibhausgasemissionen liegt im Allgemeinen darin, eine Abschätzung zur Höhe der Umweltwirkung vornehmen zu können. Für diese „Wirkungsabschätzung von Umweltauswirkungen“ gibt es mehrere Herangehensweisen. Eine davon ist die Ökobilanz, auch bekannt unter der englischen Bezeichnung Life Cycle Assessment (LCA) (Deckert, 2021, S. 104). Die Ökobilanz wird dabei laut DIN EN ISO 14040, welche Rahmenbedingungen und Grundsätze zur Ökobilanz festhält, als „eine Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“ definiert; es werden demnach sämtliche Umweltwirkungen „von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung“ (DIN EN ISO 14040, S. 7) untersucht. Die Norm versteht als Produkt sowohl Waren als auch Dienstleistungen. Waren werden dabei in die Kategorien Software, Hardware oder verfahrenstechnische Produkte eingeteilt; unter Dienstleistungen fallen beispielsweise Transporte. Die Methode der Ökobilanz dient als Hilfe zur Darstellung von Umweltverbesserungen einzelner Produkte. Mit ihr können Unternehmen Potenziale ermitteln und die Prozesse und Produkte effizienter gestalten“ (Deckert, 2021, S. 104, 105). Demgegenüber steht die Entwicklung von Carbon Footprints, übersetzt „Kohlenstoff-Fußabdruck“. Diese „[...] stellen eine spezielle Form von Ökobilanzen dar. Hierbei wird mithilfe des Wirkungsindikators „CO₂-Emission“ die Wirkungskategorie „Treibhauseffekt“ analysiert. Es wird „[...] ermittelt, wie viel Kohlenstoff ein Unternehmen, ein Produkt oder eine Dienstleistung in die Umwelt entlässt und somit zur Klimaveränderung beiträgt“ (Deckert, 2021, S. 105). Es herrschen drei Arten von Carbon Footprints vor (vgl. Tabelle 1) (Deckert, 2021, S. 106).

Tabelle 1: Arten von Carbon Footprints. In Anlehnung an Schmied & Knörr (2013, S. 20), Deckert (2021, S. 106)

	Corporate Carbon Footprint	Product Carbon Footprint	Transport Carbon Footprint
Normen und Standards	ISO 14064-1 GHG Protocol	PAS 2050 GHG Protocol ISO 14040 ff.	DIN EN 16258
Systemgrenzen	Aktivitäten des eigenen Unternehmens verpflichtend, Einbezug von Subunternehmen freiwillig	Gesamte Wertschöpfungskette, unabhängig ob eigene oder Fremdprozesse	Gesamte Transportkette, unabhängig ob eigene Fahrzeuge oder Fahrzeuge von Subdienstleistern
Umweltkenngößen	Alle Treibhausgase (als CO ₂ -Äquivalente)	Alle Treibhausgase (als CO ₂ -Äquivalente)	Alle Treibhausgase (als CO ₂ -Äquivalente) & Energieverbrauch

	Corporate Carbon Footprint	Product Carbon Footprint	Transport Carbon Footprint
Emissionen durch Herstellung von Energieträgern	Herstellung von selbst verbrauchtem Strom: ja Andere Energieträger: freiwillig	Müssen berücksichtigt werden	Müssen berücksichtigt werden

In Unternehmensklimabilanzen, auch Corporate Carbon Footprint (CCF) genannt, werden die CO₂-Emissionen eines gesamten Unternehmens oder einer Organisation bilanziert. Hierbei werden „[...] alle direkten Input- und Outputströme des gesamten Unternehmens“ beleuchtet (Deckert, 2021, S. 109). Demgegenüber bilanziert der Product Carbon Footprint (PCF) die CO₂-Emissionen eines Produkts über den gesamten Produktlebenszyklus; es werden alle Input- und Outputströme von der Wiege bis zur Bahre („Cradle-to-Grave“) betrachtet (ISO 14064). Der Transport Carbon Footprint (TCF) bilanziert dagegen „[...] speziell die Treibhausgase, die bei einer Transportdienstleistung entstehen“ (Deckert, 2021, S. 108). Das GHG Protocol, wie auch die Normen ISO 14064¹ und ISO/TS 14067² stellen weltweit anerkannte Standards zur Berechnung von CO₂-Emissionen von Unternehmen, Organisationen oder Produkten dar. In keinem dieser Standards wird jedoch ein spezielles Verfahren für das Transportmanagement beschrieben. Um diese Lücke zu schließen, wurde die Norm DIN EN 16258 speziell für die Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen entwickelt (Deckert, 2021, S. 108). Vor der Einführung der DIN EN 16258 im Jahr 2013 „[...] erfolgte die Messung der Treibhausgasemissionen von Transportdienstleistungen auf der Basis meist unterschiedlich anspruchsvoller Verfahrensweisen und Annahmen, was zu einer Intransparenz über die verschiedenen Methoden und mangelnde Vergleichbarkeit der Carbon Footprints von Transportdienstleistungen in der Branche führte.“ Durch die Norm konnte die „[...] Ermittlung von transportdienstleistungsbedingten Treibhausgasemissionen“ standardisiert werden (Deckert, 2021, S. 65). Auch der Deutsche Speditions- und Logistikverband (DSLTV) nimmt in seinem Leitfaden zur „Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258“ auf die Norm Bezug und verweist auf die mit ihr Einzug findende erstmalige Standardisierung der Emissionsberechnung im Transportwesen (Schmied & Knörr, 2013).

Eine Weiterentwicklung der DIN EN 16258 wird jedoch zukünftig vonnöten sein. Die Norm beschreibt zwar die Methodik zur Bilanzierung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen, sie

¹ Die ISO 14064 ist eine Normenreihe, welche Anleitungen zur quantitativen Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen in einer THG-Bilanz auf Organisations- und Projektebene enthält.

² Die ISO/ TS 14067 ist eine technische Spezifikation, welche Anforderungen an und Leitlinien für die Quantifizierung und Kommunikation des Carbon Footprint eines Produkts auf der Grundlage internationaler Normen zur Ökobilanz festlegt.

beinhaltet jedoch lediglich die reinen Transportprozesse; weitere Prozesse der Transportkette, wie Umschlags- und Dispositionsprozesse, werden nicht mit berücksichtigt (Deckert, 2021, S. 69). Ausgehend vom europäischen Verband für Spedition, Transport, Logistik und Zolldienstleistungen (CLECAT), wurde deshalb auf Grundlage der bisherigen Norm an einer neuen ISO-Norm 14083 für die Treibhausgasbilanzierung von Logistiklieferketten gearbeitet; diese wurde im März 2023 publiziert (ISO, 2023). Neu ist die beschriebene Methodik zur Quantifizierung von Emissionen in Lager- und Umschlagprozessen sowie die Betrachtung von Rohrleitungs- und Seilbahntransport wie auch Besonderheiten im gekühlten Transport. Darüber hinaus erfolgen genauere Angaben zur Kategorisierung der Verkehrsträger und auch eine Abschätzung von Rußemissionen aus dem Verkehrsbetrieb wird durch die Norm ermöglicht. Für den hier betrachteten, direkten Transport, erfolgten jedoch keine Änderungen in der Berechnung der Treibhausgasemissionen.

Die aktuelle Studienlage zu den hier betrachteten Fragestellungen fällt gering aus. Es findet sich ausreichend Literatur zur Beschreibung unterschiedlicher Verkehrsträger im Gütertransport wie in Büter (2017) unter wirtschaftlichen Aspekten oder in Woitschützke (2013) unter verkehrsgeographischen Aspekten, sowie dem Vergleich unterschiedlicher Transportmittel hinsichtlich ihres Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen wie in Umweltbundesamt (2021b) und Umweltbundesamt (2023). In Brockmann (2013) „Ansatz zur Bestimmung des Carbon Footprint für die Distributionslogistik von Fast Moving Consumer Goods mit Hilfe von Simulation“ wurden Treibhausgasemissionsquellen im Transport nach Verkehrsträger identifiziert und in einem Simulationsmodell umgesetzt.

Der Vergleich zwischen verschiedenen Arten von Handelsstrecken und deren Einfluss auf die Emissionshöhe konnte in der Literaturrecherche jedoch nicht gefunden werden. Auch die Durchführung einer Verknüpfung der Treibhausgasemissionsfaktoren der Kurz- und Langstrecke mit der derzeitigen Transportmittelverteilung von Importen nach Deutschland je nach Exportland wurde in der Literatur bislang nicht festgehalten.

Im Hinblick auf den Einfluss des jeweiligen Strommix eines Landes auf die Höhe der Treibhausgasemissionen im Schienengüterverkehr konnte ebenfalls keine einschlägige Literatur gefunden werden. Weitreichende Forschung in dem betrachteten Themenbereich findet sich lediglich in möglichen Ansätzen zur Durchführung der Verkehrswende hinsichtlich der Dekarbonisierung des Verkehrs durch zunehmende Elektrifizierung wie in Blanck et al. (2013) oder Rudolph et al. (2017).

Es kann festgehalten werden, dass die Anwendung der DIN EN 16258 für die Berechnung von Transportemissionen bereits von mehreren Quellen umfassend beschrieben und evaluiert wurde, und auch der ökologische Vergleich verschiedener Verkehrsträger ist in der Literatur umfassend durchgeführt worden. Darüber hinaus findet sich in der Literatur einschlägige Forschung hinsichtlich

Umsetzungsmöglichkeiten einer Dekarbonisierung des Verkehrs. Neu dagegen ist der Vergleich zweier für den eurozentrischen Handel relevanter Handelsstrecken angesichts des THG-Ausstoßes, sowie die Kombination von THG-Emissionshöhe und der derzeitigen Transportmittelverteilung nach Außenhandelspartner durch die Entwicklung eines allgemeinen THG-Emissionsfaktors jeweils für die Kurz- und Langstrecke. Auch die Berechnung und der Vergleich der THG-Emissionen im Schienengüterverkehr auf den betrachteten Strecken je nach Strommix der Länder wird in der vorliegenden Arbeit erstmals betrachtet.

Die vorliegende Arbeit hat keinen Anspruch darauf, eine ganzheitliche Bewertung der Transportarten zu vollziehen, da die alleinige Betrachtung des THG-Ausstoßes nur eine grobe Einordnung der Klima- und Umweltwirksamkeit eines Verkehrsträgers bietet. Auch andere Emissionen müssen bei der Bewertung berücksichtigt werden. Hierzu gibt es bereits einschlägige Literaturquellen, die umweltrelevante Wirkungen von Beförderungsmitteln ganzheitlich betrachten, wie beispielsweise die Studie des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2020 zur ökologischen Bewertung von Verkehrsarten. Hierbei wurden verschiedene Umweltwirkungen im Verkehrssektor ausgewertet, die in einem Verkehrsartenvergleich dargestellt werden sollten, wie den kumulierten Energieaufwand (KEA), den kumulierten Rohstoffaufwand (KRA), Treibhausgasemissionen, Luftschadstoffe (Kohlenmonoxid, Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe, Stickoxide, Schwefeldioxid und Feinstaub) und der Flächenbelegung (Allekotte et al., 2020, S. 60). Auch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur veröffentlichte einen Umweltbericht zum Bundesverkehrswegeplan, in welchem eine strategische Umweltprüfung (SUP) zum Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2030 beschrieben wird: „Der Kern der SUP-Methodik zum BVWP 2030 betrifft die Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der Umweltauswirkungen der konkret in den BVWP eingestellten Bundesverkehrswegeprojekte“ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2016, S. 8). In der Untersuchung „[...] betriebsbedingte[r] Projektwirkungen“, welche sich auf die „[...] Wirkungen aus dem Betrieb von Fahrzeugen, Flugzeugen und Binnenschiffen“ beziehen, werden neben Emissionen klimarelevanter Gase unter anderem auch Geräuschemissionen und Schadstoffemissionen wie Stickoxide und Feinstaubemissionen, aber auch Abrieb von Bremsen, Reifen und Straßenbelag bewertet (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2016, S. 10). Weiterhin finden sich in der Fachliteratur Beschreibungen zur Analyse von Umweltwirkungen sowie Berechnungsverfahren zur Beurteilung von Umweltwirkungen (Vallée et al., 2021).

Neben der Betrachtung verschiedener Umweltwirkungen ausgehend vom Gütertransport, kann auch die Untersuchung von Unterschieden in der Emissionshöhe beim Transport verschiedener Güterarten relevant sein. Eine Studie des Öko-Instituts zur nachhaltigen Mobilität durch Innovationen im Güterverkehr zeigt unterschiedliche Emissionshöhen für Volumengut- und Massenguttransporte im Schienengüterverkehr auf (Schmied et al., 2007, S. 30). Und auch der DSLV Leitfadens beleuchtet

unterschiedliche Arten von Gütern und ihren Einfluss auf den THG-Ausstoß der Verkehrsträger (Schmied & Knörr, 2013, S. 13).

Da die vorliegende Arbeit den Transport von Gütern mittels eines Verkehrsträgers auf einer Strecke betrachtet, kann der Blick auf einen intermodalen Gütertransport, demnach die Streckenbewältigung mittels zwei oder mehr Beförderungsmitteln, ebenfalls von Interesse sein. Im Gegensatz zur Forschung im Bereich Umweltwirkungen im Verkehr, ist die Datenlage hinsichtlich der Bewertung und dem Vergleich der Emissionen im kombinierten Verkehr weniger umfangreich. In Benetka (2009) werden die CO₂-Emissionen des kombinierten Verkehrs von Straße und Schiene mit dem reinem Straßentransport betrachtet und miteinander verglichen. Leerkamp (2020) beschreibt die Vorteile und benötigten Voraussetzungen für das Wachstum des Kombinierten Verkehrs, thematisiert jedoch nicht die Auswirkungen auf entstehende Emissionen. Trotz der geringer ausfallenden Literaturgrundlage zeigt sich auch anhand des europäischen Green Deals, dass der intermodale Transport ein relevantes Thema darstellt: „Der multimodale Verkehr muss kräftig angekurbelt werden, sodass das Verkehrssystem effizienter wird. Vorrangig sollte ein wesentlicher Teil des Anteils von 75 % des Güterbinnenverkehrs, der derzeit auf der Straße abgewickelt wird, auf die Schiene und auf Binnenwasserstraßen verlagert werden.“ (Europäische Kommission, 2019, S. 12).

3.2 Definitionen

3.2.1 Transportlogistik

Die Logistik als Begriff umfasst ein breites Spektrum an Tätigkeitsbereichen, aufgrund dessen es unterschiedlichste Definitionen für die Logistik gibt. Die gemeinsame Grundlage der Definitionsvielfalt ist folgende: „Logistische Prozesse sind alle Transport- und Lagerungsprozesse sowie das zugehörige Be- und Entladen, Ein- und Auslagern (Umschlag) und das Kommissionieren“ (Arnold et al., 2008). Ziel dieser Prozesse ist die „bedarfsgerechte Verfügbarkeit von Objekten“ (Arnold et al., 2008) oder auch die „Raumüberbrückung (Transport), Zeitüberbrückung (Lagerung) und Veränderung der Anordnung (Kommissionierung) der Objekte“ (Arnold et al., 2008). Eine häufig zu findende Definition für die Logistik ist weiterhin die Seven-Rights-Definition nach Plowman: „Logistik heißt, die Verfügbarkeit des richtigen Gutes, in der richtigen Menge, im richtigen Zustand, am richtigen Ort, zur richtigen Zeit, für den richtigen Kunden, zu den richtigen Kosten zu sichern“ (Baumgarten, 2008, S. 231). Deutlich wird in den betrachteten Definitionen, „[...] dass eine Logistikdienstleistung auch immer etwas mit Ortsveränderung zu tun hat“ (Baumgarten, 2008, S. 231). Daher nimmt die Transportlogistik eine besondere Position ein. Die Transportlogistik befasst sich mit der Bewegung von „Gütern (fest, flüssig, gasförmig) zwischen verschiedenen Orten innerhalb von Logistiknetzwerken (Transportnetzstruktur)“ (Baumgarten, 2008, S.231). Der Transport an sich erfolgt durch einen Frachtführer oder Spediteur; organisiert wird der Transport durch einen Spediteur als Logistikdienstleister, der häufig zusätzliche Dienstleistungen rund um die Transportlogistik erbringt (Baumgarten, 2008).

3.2.2 Lieferketten von Unternehmen

Unter dem Begriff der Lieferkette, gleichwohl bekannt als Supply Chain, lässt sich eine „Kette von hintereinander geschalteten Lieferanten“ verstehen, „die gemeinsam an der Fertigung und Lieferung von Produkten und/ oder Dienstleistungen bis hin zum Endabnehmer abgestimmt arbeiten“ (Kortus-Schultes & Ferfer, 2005, S. 5). Die Lieferkette beginnt dabei beim Rohstofflieferanten und endet beim Endverbraucher (Beckmann, 2004, S. 1). Ziel innerhalb der Lieferkette ist die Entwicklung einer unternehmensübergreifenden Wertschöpfungskette: Auf jeder Produktionsebene steigert sich der Produktwert, da ein Gut von einem Lieferanten gekauft und nach dem Bearbeitungsprozess an den nächsten Kunden innerhalb der Lieferkette verkauft wird (A. Kuhn & Hellingrath, 2002, S. 10).

3.2.3 Emissionsfaktoren

Wesentlich für die Berechnung der Transportemissionen im geplanten Modell ist das Heranziehen von Emissionsfaktoren jeweils für den Transport mittels Frachtflugzeug, über den Seeweg, via Schienen- oder über den Straßenverkehr. Emissionsfaktoren, auch Umrechnungsfaktoren genannt, stellen dabei

das „Verhältnis der Masse eines freigesetzten (emittierten) Stoffes zu der produzierten Energieeinheit“ (Deutscher Bundestag, 2022, S. 7) dar. Die Definition der Greenhouse Gas Protocol Initiative (GHG Protocol), ein von Unternehmen, Nichtregierungsorganisationen und Regierungen international anerkannter Standard für die Rechnungslegung und Berichterstattung von Unternehmen zu ihren THG-Emissionen, ist noch etwas allgemeiner definiert und trifft die Intention der vorliegenden Arbeit genauer. Hiernach ist der Emissionsfaktor „ein Faktor, der es ermöglicht, THG-Emissionen aus einer Einheit verfügbarer Aktivitätsdaten (z.B. Tonnen Treibstoffverbrauch, produzierte Tonnen eines Produkts) und den absoluten THG-Emissionen zu berechnen.“ (World Business Council for Sustainable Development & World Resources Institute, 2004, S. 97). Im hier vorliegenden Fall werden Treibhausgase in CO₂-Äquivalenten betrachtet, die pro Tonnenkilometer Frachttransport emittiert werden. Die Höhe des jeweiligen CO_{2e}-Emissionsfaktors zeigt damit auch an, wie emissionsintensiv die betrachtete Transportart im Vergleich ist. Dabei gilt: Je höher der Emissionsfaktor, desto emissionsintensiver der Transport.

3.2.4 Spezifische Emissionshöhe

Die spezifische Emissionshöhe, oder auch Emissionsintensität, setzt die absoluten Treibhausgasemissionen, die während der Beförderung von Gütern mittels eines Verkehrsträgers über eine Strecke x entstehen, mit der dabei vorliegenden Transportleistung in Relation. Mit dem Begriff wird demnach die Menge an Emissionen von Kohlendioxid [beschrieben], die pro Einheit einer weiteren Variablen wie [...] Transport freigesetzt wird“ (IPCC, 2016, S. 16). Die spezifische Emissionshöhe wird in der vorliegenden Arbeit ausgedrückt als Masse Kohlendioxidäquivalent (CO_{2e}) pro Tonnenkilometer. Sie erlaubt demnach einen haltbaren Vergleich der vorliegenden Verkehrsträger, da diese die Emissionen pro Tonnenkilometer betrachtet und damit aufzeigt, welche Verkehrsträger pro beförderte Tonne und zurückgelegter Strecke hohe Treibhausgasemissionen aufweisen und welche Beförderungsmittel Güter hingegen energieeffizient transportieren.

3.2.5 Kurz- und Langstrecke

Allgemein ist die Festlegung, bis wann eine Strecke eine Kurzstrecke ist und ab wann sie als Langstrecke gilt, in Abhängigkeit zu der jeweiligen Beförderungsart zu sehen, mit der eine Strecke zurückgelegt wird. Im Bereich der Transportlogistik ist es daher naheliegend, Flugstrecken heranzuziehen, da im Kontext von globalen Lieferketten größere Entfernungen zurückgelegt werden müssen. Für die vorliegende Arbeit wird daher die Definition nach Mensen(2013) herangezogen; hierbei gelten Flugstrecken bis 1.000 Kilometer als Kurzstrecke und Strecken über 3.000 km als Langstrecke.

3.3 Güterverkehr

Durch die wirtschaftliche Entwicklung hin zu geringeren Lagerbeständen, kürzeren Lieferzyklen und globalen Strukturen hat sich der Anspruch an den Güterverkehr in den letzten Jahrzehnten zu schnelleren und flexibleren Transporten, sowie die effiziente Überwindung von großen Distanzen stark erhöht. „In Konsequenz dieser Entwicklung zeigt die Statistik ein starkes Wachstum des Gütertransports über die vergangenen Jahrzehnte, woran insbesondere der Lkw, das Containerschiff und das Flugzeug hohe Anteile haben“ (Nuhn & Hesse, 2006, S. 29). Allgemein hat sich die „[...] Verkehrsleistung des Güterverkehrs in Deutschland [...] in den vergangenen 20 Jahren verdoppelt. Das bedeutet, dass immer mehr Güter über immer weitere Strecken transportiert werden“ (Allianz pro Schiene, 2022).

Deutsche Zahlen zum Gütertransport spiegeln besonders die große Rolle des See- und Straßenverkehrs wider: die Außenhandelsstatistik aus dem Jahr 2020 wird im europäischen Intrahandel vom Straßenverkehr mit einem Verkehrsaufkommen von 192 Millionen Tonnen angeführt; mit einem Verkehrsaufkommen von 112 Millionen Tonnen liegt der Seeverkehr auf dem ersten Platz im Importhandel mit Drittstaaten (statistisches Bundesamt, 2021). In Abbildung 2 und Abbildung 3 sind die Zahlen graphisch aufbereitet.

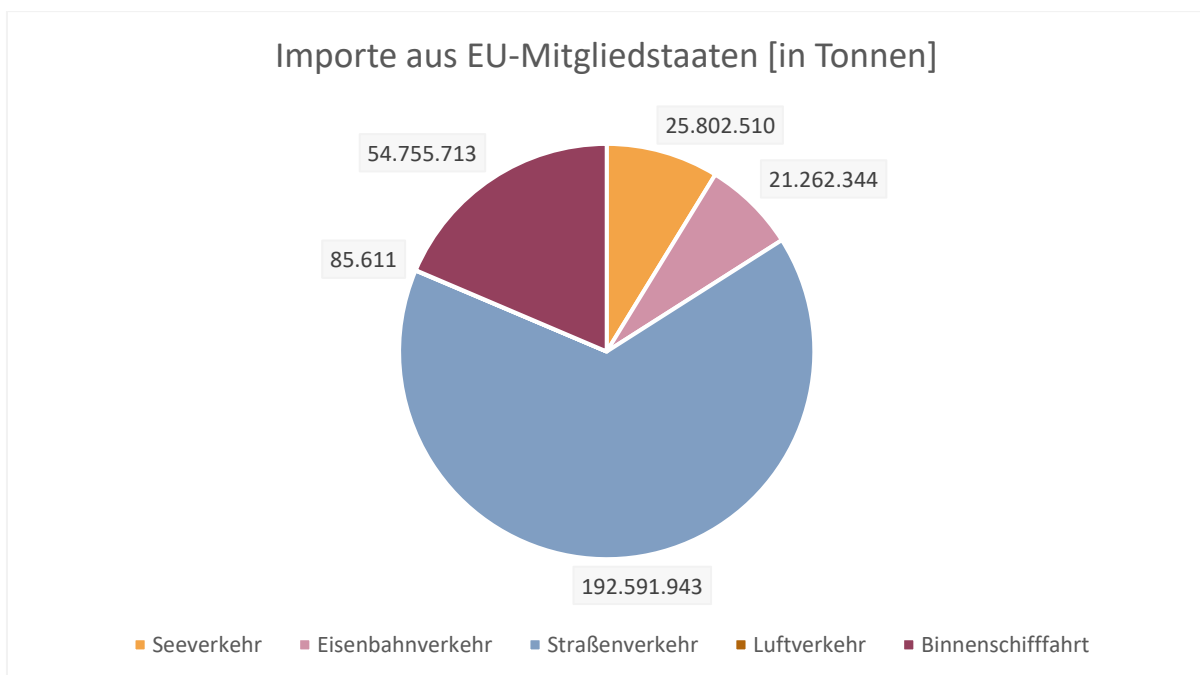


Abbildung 2: Importmengen nach Deutschland aus den EU-Mitgliedstaaten aus dem Jahr 2020. Mengen in Tonnenangaben. Transport via Rohrleitungen sind in der Graphik nicht berücksichtigt. Quelle: eigene Abbildung nach statistisches Bundesamt (2021)

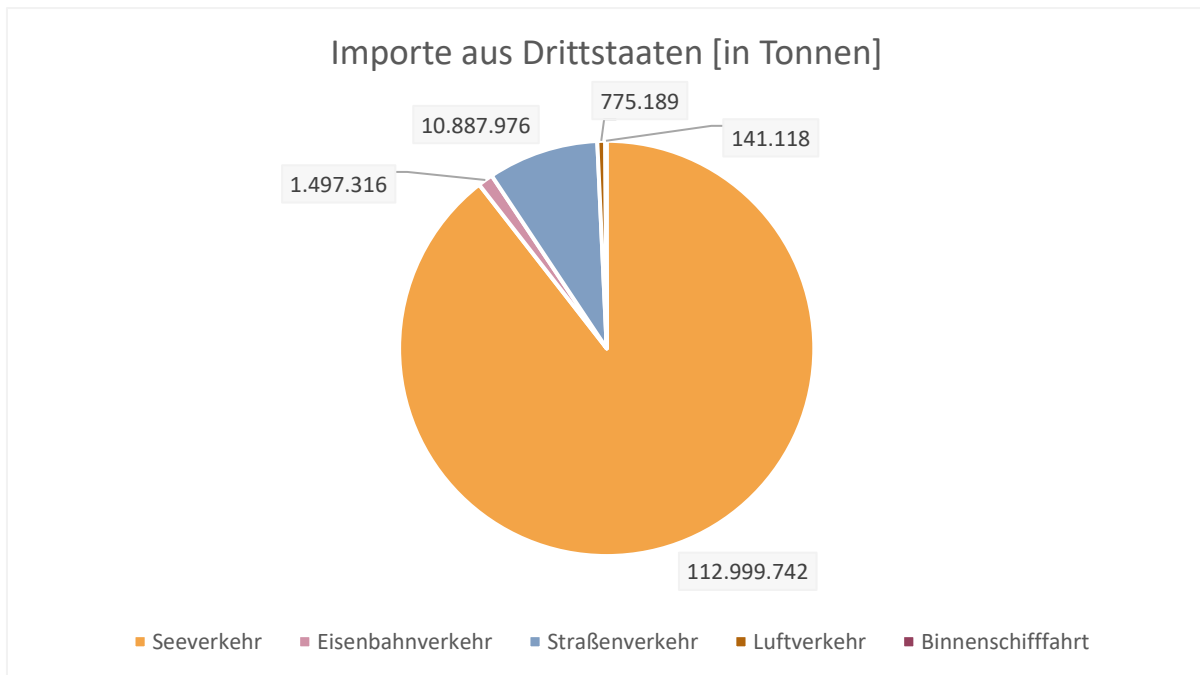


Abbildung 3: Importmengen nach Deutschland aus Drittstaaten aus dem Jahr 2020. Mengen in Tonnenangaben. Transport via Rohrleitungen sind in der Graphik nicht berücksichtigt. Quelle: eigene Abbildung nach statistisches Bundesamt (2021)

Häufig ist der Güterverkehr gekennzeichnet durch einen intermodalen Transport, das bedeutet, dass die zu befördernde Ware auf ihrem Transportweg von mehr als nur einem Verkehrsträger transportiert wird. Der intermodale Transport charakterisiert sich jedoch dadurch, dass nur die geladene Einheit das Verkehrsmittel wechselt und nicht die einzelnen Güter umgeschlagen werden (Logistische Informationssysteme AG, 2021). Dadurch kommen standardisierte Ladeeinheiten zum Einsatz, vor allem Container. Vorrangig unterscheidet man hier zwischen genormten 20-Fuß-ISO-Container mit einer Länge von 6,10 Meter und 40-Fuß-ISO-Container. Der 20-Fuß-ISO-Container bildet die Grundlage für eine in der Logistik stark verbreitete statistische Hilfseinheit TEU (Twenty-foot Equivalent Unit) „[...] zur Beschreibung von Verkehrsströmen oder -kapazitäten“ (FIS Mobilität und Verkehr, 2022). Ein 20 Fuß-ISO-Container entspricht demzufolge ein TEU, ein 40-Fuß-ISO-Container ist mit zwei TEU gleichzusetzen, wird jedoch als FEU bezeichnet (Forty-foot Equivalent Unit). Detaillierte Maße des 20-Fuß-Containers können aus Tabelle 2 entnommen werden.

Die durch den intermodalen Transport entstehende Transportkette wird in Vorlauf, Hauptlauf und Nachlauf eingeteilt. Im Vorlauf erfolgt die „[...] Abholung beim Sender“, im Hauptlauf wird der größte Teil der Strecke überwunden und abschließend erfolgt im Nachlauf die „[...] Verteilung auf die Empfänger“ (Sucky et al., 2019, S. 18). In der vorliegenden Arbeit sollen die gewählten Strecken nur im Hauptlauf betrachtet werden.

Tabelle 2: Technische Daten eines 20-Fuß-Containers. Quelle: (Hapag-Lloyd, 2023)

Technische Daten	
Innenmaße [L x B x H in mm]	5.900 x 2.352 x 2.395
Nutzbares Ladevolumen [m ³]	33,2
Maximale Zuladung [kg]	30.130

3.3.1 Schiffsverkehr

Seeschiffsverkehr

Für den internationalen Warenverkehr mit der Herausforderung, große Distanzen überwinden zu müssen, gilt der Seeschiffsverkehr als eines der wichtigsten Beförderungsmittel (Woitschützke, 2013, S. 388). Speziell der Containerverkehr hat seit seinen Anfängen in den 1950er-Jahren mittlerweile eine dominierende Stellung in der Linienschifffahrt eingenommen.

Die Seeschifffahrt hat in den letzten 20 Jahren eine starke Entwicklung durchlaufen. Insbesondere die Zunahme des Containerverkehrs hat die Entwicklung maßgeblich geprägt. Immer mehr Waren werden in standardisierten Containern transportiert, was die Effizienz erhöht und die Handhabung vereinfacht. Diese Entwicklung geht einher mit einer zunehmenden Globalisierung, einem starken Wirtschaftswachstum in Ländern mit hohen Seeverkehrsintensitäten wie China und einem allgemeinen Anstieg des Welthandels. Darüber hinaus ist eine bedeutende Veränderung der letzten Jahre das Wachstum der Containerschiffe. Diese werden immer größer und können dadurch mehr Fracht transportieren (FIS Mobilität und Verkehr, 2022).

Vor allem die Transportkapazität der Containerschiffe wurde in den letzten Jahren kontinuierlich erweitert. Die Durchschnittskapazität liegt inzwischen bei 4.528 TEU, jedoch gibt es bereits mehrere Containerschiffe, welche Ladungsmengen von über 20.000 TEU transportieren können. Der Druck hin zu steigenden Schiffsgrößen und sinkenden Einheitskosten durch die Intensivierung der globalisierten Wirtschaft bewirkte im Containerverkehr die Entstehung international operierender Anbieter (FIS Mobilität und Verkehr, 2022). Derzeit im Einsatz sind knapp 5.300 Containerschiffe, die eine Gesamtkapazität von etwa 23 Millionen TEU vorweisen (FIS Mobilität und Verkehr, 2022).

Binnenschifffahrt

Die Binnenschifffahrt unterscheidet sich von der Seeschifffahrt darin, dass Binnengewässer wie Flüsse und Kanäle als Wasserstraßen genutzt werden. Mittels Binnenschiffen werden vorwiegend Massengüter transportiert: Im Jahr 2019 wurden „[...] rund 83 Prozent der Verkehrsleistung mit Massenguttransporten erzielt“ (Transport Informations Service, 2023). Unter Massengüter zählen Güter wie Erze, Steine und Erden, Kohle, Rohöl und Erdgas; Güter, deren Stückzahl nicht eindeutig bestimmt werden kann sondern allein die Gesamtmasse relevant ist.

Neben des Massenguttransports steigt seit Anfang der 1990er Jahre jedoch auch die Bedeutung des Containerverkehrs. Zwischen Januar und Oktober wurden in Deutschland im Jahr 2019 rund 2,1 Millionen TEU mittels Binnenschiffe transportiert (FIS Mobilität und Verkehr, 2021). Vorteile der Binnenschifffahrt sind unter anderem die niedrigen Transportkosten und der niedrige Energieverbrauch, die hohe Verkehrssicherheit als auch die Möglichkeit, Kapazitäten weiter auszubauen. Nicht nur innerhalb Deutschlands, sondern auch in ganz Europa gilt der Rhein als wichtigste Binnenwasserstraße: Etwa zwei Drittel des Güterverkehrs in der Binnenschifffahrt erfolgt über den Rhein (Woitschützke, 2013, S. 141) (Transport Informations Service, 2023).

3.3.2 Luftfrachtverkehr

Luftfrachtverkehr, im Englischen auch als Air-Cargo bezeichnet, steht für die allgemeine Beförderung von Gütern mit Flugzeugen (IHK München, 2018). Bezogen auf das Gewicht der international transportierten Güter liegt der Anteil der Luftfracht am weltweiten Handel bei circa einem Prozent; bezogen auf den Warenwert liegt dieser hingegen bei rund 40 Prozent. Grund dafür ist, dass der Luftfrachtverkehr mehrheitlich „kapitalintensive, kurzlebige und verderbliche Güter“ befördert, gegensätzlich zur Seefracht (bpb, 2017). Typische Güter in der Luftfracht sind demnach Produkte der Elektroindustrie, vornehmlich im Kommunikationsbereich (durch kurze Produktzyklen), der Modebranche (durch kurzlebige Trends) und vor allem der Transport von „Maschinen, optischen und medizinischen Instrumenten sowie Produkten der chemisch-pharmazeutischen Industrie“ (bpb, 2017). Kennzeichnend für die Luftfracht sind einerseits die sehr hohen Transportkosten im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern. Auch ist die Transportkapazität der Flugzeuge vergleichsweise gering, ebenso wie die Netzdichte aufgrund der Bindung an Flughafenstandorte. Demgegenüber kann die Luftfracht mit vergleichsweise geringen Verpackungskosten punkten, da die Ware aufgrund des Transports in der Luft weniger vor Erschütterungen geschützt werden muss. Ein großer Vorteil der Luftfracht ist zusätzlich die kurze Transportzeit, was insbesondere bei dringenden Sendungen von großer Bedeutung ist (Arnold et al., 2008, S. 758).

Sinnvoll bei der Betrachtung von Luftfracht ist die Unterscheidung zwischen konventioneller Luftfracht und KEP-Verkehr (Kurier-, Express- und Paketverkehr), da je nach Frachtart andere Logistikprozesse vorherrschen und unterschiedliche Unternehmen an den Prozessen beteiligt sind (IHK München, 2018). Typisch für den KEP-Verkehr sind üblicherweise standardisierte Paketsendungen, die von eigener oder gecharterter Luft- und Straßenfahrzeugflotte sowie von eigenem Personal befördert werden und bis zur Haustür des Empfängers, beziehungsweise von C2C (Customer to Customer) oder B2C (Business to Business) geliefert werden (IHK München, 2018). Im Gegensatz dazu wird die konventionelle Luftfracht in tendenziell weniger enger Zusammenarbeit zwischen Speditionen,

Fuhrunternehmen und Luftfahrtunternehmen durchgeführt und findet größtenteils als B2B (Business to Business), folglich zwischen Herstellern oder mit Großhändlern statt (IHK München, 2018).

Die Fracht kann im Luftverkehr mittels zwei verschiedenen Beförderungsarten transportiert werden: Es können entweder reine Luftfrachtflugzeuge eingesetzt werden, oder die Fracht wird als „Beifracht im Laderaum von Passagierflugzeugen“, auch bekannt unter dem Begriff Bellyfracht, befördert³ (IHK München, 2018, S. 7). In der vorliegenden Arbeit wird im weiteren Verlauf lediglich die konventionelle Luftfracht und der Transport in Frachtflugzeugen betrachtet.

3.3.3 Straßengüterverkehr

Vorwiegendes Beförderungsmittel im Straßengüterverkehr ist der Lastkraftwagen (Lkw). Unterschiede in den Arten von Kraftfahrzeugen sind gesetzlich festgelegt, im deutschen Recht bildet entsprechend die Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO) hierfür die gesetzliche Grundlage. Unterschieden werden Lkw dabei nach zulässigem Gesamtgewicht, Abmessungen, Aufbauten und nach Art der Anhänger (Arnold et al., 2008, S. 728). In der vorliegenden Arbeit werden 40 Tonnen-Lastzüge, bestehend aus Lkw und einem Anhänger zur Güterbeförderung mit einer Maximallänge von 18,75 m als Transportmittel im Straßengüterverkehr betrachtet (StVZO, §32 Absatz 4).

Ein großer Vorteil des Straßengüterverkehrs gegenüber anderen Beförderungsarten ist das Potenzial, durch die meist flächendeckende Infrastruktur jeden gewünschten Ort direkt erreichen zu können – unter der einzigen Voraussetzung, dass dieser an das Straßennetz angebunden ist. Weiterhin sind Lkw meist direkt für den Transport von Containern konzipiert, das bedeutet, der Umschlag „[...] in den nächsten Teil der Transportkette“ kann problemlos durchgeführt werden (Sucky et al., 2019, S. 19).

3.3.4 Schienengüterverkehr

Auch wenn im Landverkehr bisweilen der Straßengüterverkehr dominiert, nimmt der Schienengüterverkehr in Deutschland eine wichtige Rolle ein: Rund 20 Prozent des jährlichen Güteraufkommens wird mit Güterzügen befördert und auch auf europäischer Ebene soll der Schienenverkehr weiter ausgebaut werden (Sucky et al., 2019, S. 15). „Interkontinentale Landverkehrswege“ sind im Gegensatz dazu eher die Seltenheit, „die bedeutendste und ausgedehnteste Verbindung ist das euroasiatische Bahnnetz“ (Sucky et al., 2019, S. 15). Ein Vorteil des Schienengüterverkehrs gegenüber dem Straßengüterverkehr ist die wesentlich höhere Transportkapazität; daher eignet die Schiene sich vor allem bei hohen Mengen oder großen Massen zu transportierender Güter. Im Schienentransport herrschen zwei Arten von Verkehrskonzepten vor:

³ Das Gepäck von Flugpassagieren zählt nicht zur Luftfracht. Quelle: IHK München (2018).

Ganzzugverkehre fahren mit allen Waggons von einem gemeinsamen Startpunkt zum gleichen Empfangsbahnhof. Das Gegenkonzept bildet der Einzelwagenverkehr ab: hier werden „[...] einzelne Wagen durch ein- oder mehrmalige Rangiertätigkeiten an Satelliten, Knotenpunkt- oder Rangierbahnhöfen erst zu ausgelasteten Gesamtzügen organisiert“ (Sucky et al., 2019, S. 20).

Im europäischen Kontext ist eine Güterzuglänge von 740 Metern längst Standard. In Deutschland fährt jedoch bislang nur jeder zehnte Güterzug mit einer Länge von 740 Metern. Das Schienennetz soll jedoch bis zum Jahr 2030 so ausgebaut werden, dass der europäische Standard auch in Deutschland flächendeckend zum Tragen kommt. Ein 740 Meter langer Güterzug fährt mit 35 Wagen und kann 105 TEU transportieren (FIS Mobilität und Verkehr, 2019).

3.4 Emissionsberechnung

Die Veröffentlichung von Umwelt- und Nachhaltigkeitsberichten ist in vielen Unternehmen bereits Standard. Wesentlicher Bestandteil dieser Berichte ist dabei die Emissionsberechnung: Auf Grundlage von gemessenen Energieverbräuchen wird mit „energieträgerspezifischen Umrechnungsfaktoren in CO₂- bzw. Treibhausgasemissionen umgerechnet“ (Schmied & Mottschall, 2019, S. 10).

Für die Emissionsberechnung bzw. die Erstellung einer Klimabilanz existieren verschiedene Normen und Standards, beispielsweise dem GHG Protocol, welche Vorgaben sowohl zu der Berechnungsmethodik als auch zu den Systemgrenzen machen. Um trotz verschiedener Normen eine Vergleichbarkeit zwischen den Klimabilanzen unterschiedlicher Unternehmen herstellen zu können, muss die verwendete Methode dokumentiert werden (Schmied & Mottschall, 2019).

Je nach Standard kann es sich bei den Klimabilanzen entweder um CO₂- oder um Treibhausgasbilanzen handeln. Kohlendioxid ist das bekannteste und weitreichendste der Treibhausgase. Laut Kyoto-Protokoll müssen jedoch noch fünf weitere Treibhausgase als relevant erachtet werden: Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW), perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) und Schwefelhexafluorid (SF₆). Bei der Verbrennung von Öl, Gas oder Kraftstoffen entstehen Methan und Distickstoffoxid als Abfallprodukte; die weiteren genannten Spurengase können entweder durch industrielle Prozesse oder direkt bei deren Verwendung freigesetzt werden, wie zum Beispiel Fluorkohlenwasserstoffe, die als Kältemittel eingesetzt werden (Matthias Schmied & Mottschall, 2019). Wichtig für die Klimabilanzen sind die genannten Treibhausgase deshalb, da sie über ein höheres Global Warming Potential (GWP) verfügen als Kohlendioxid; das bedeutet, bei gleicher Menge erwärmen sie die Atmosphäre sehr viel stärker als Kohlendioxid (vgl. Tabelle 3). Um die Bilanz nicht mit sechs verschiedenen Treibhausgasen einzeln durchführen zu müssen, werden sie in „[...] so genannte CO₂-Äquivalente umgerechnet und addiert“ (Schmied & Mottschall, 2019, S. 10).

Tabelle 3: Global Warming Potential relevanter Treibhausgase. HFKW und FKW werden in der Tabelle nicht aufgelistet, da diese jeweils keine einzelnen Gase sind, sondern eine Gruppe von Treibhausgasen definiert und in den Gruppen Gase mit unterschiedlichsten GWP vorliegen. Quelle: (Solomon et. al, 2007, S. 33)

Treibhausgas	Chemische Formel	GWP-Faktor (100 a)
Kohlendioxid	CO ₂	1
Methan	CH ₄	25
Distickstoffoxid	N ₂ O	298
Schwefelhexafluorid	SF ₆	23.900

Weitere Unterschiede in Klimabilanzen entstehen je nach festgelegten Systemgrenzen bezüglich der Einbeziehung von indirekten Emissionen. Im Transportwesen stellt sich hierdurch konkret die Frage, ob auch die Emissionen, die bei der Herstellung von Strom und Kraftstoffen entstehen, mitbilanziert

oder lediglich die Tank-to-Wheel-Emissionen berücksichtigt werden, folglich die Emissionen, die bei der Verbrennung von Energieträgern als Antrieb für das jeweilige Transportmittel entstehen (Matthias Schmied & Mottschall, 2019). Werden diese mit den Emissionen addiert, die bei der Herstellung und Bereitstellung des Kraftstoffs entstehen, spricht man von Well-to-Wheel-Emissionen.

Bei Dieselfahrzeugen fallen unter den Bereich der indirekten Emissionen alle Emissionen, die bei der Gewinnung des Rohöls, dem Transport zur Raffinerie, der Destillation des Diesels und der Anlieferung an der Tankstelle freigesetzt werden. Bei elektrisch betriebenen Verkehrsmitteln umfassen die indirekten Emissionen diejenigen, die bei der Herstellung des Stroms für den Antrieb des Fahrzeugs entstehen (Schmied & Mottschall, 2019). Manche Normen und Standards schließen die indirekten Emissionen von Energieträgern wie Diesel oder Gas in der Emissionsberechnung aus, sodass sich im Vergleich von verschiedenen Verkehrsträgern ein verzerrtes Bild ergeben kann (Schmied & Mottschall, 2019). Um eine Vergleichbarkeit herstellen zu können, schreibt die DIN EN 16258 vor, dass die Emissionsberechnung auch die Well-to-Tank-Emissionen beinhalten muss. Weitere indirekte Emissionen aus der „Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung von Fahrzeugen oder Verkehrsinfrastruktur“ sollen jedoch ausgeschlossen werden, da hierzu meist verlässliche Daten fehlen und darüber hinaus auch der Anteil dieser Emissionen im Hinblick auf den Gesamtausstoß von geringer Bedeutung ist (Schmied & Mottschall, 2019, S. 12).

In Deutschland ist es nicht gesetzlich festgeschrieben, auf welcher methodischen Grundlage eine Emissionsberechnung durchgeführt werden muss, daher können Betriebe ihre Methode frei wählen. Trotzdem sollten sich die „[...] Autoren an den anerkannten Regeln der Wissenschaft orientieren“; das gelingt vor allem dann, wenn sich die Berechnungen an den anerkannten Normen und Standards orientieren (Schmied & Mottschall, 2019, S. 14). Wie in Kapitel 2 erläutert, wurde die in der vorliegenden Arbeit durchgeführte Emissionsberechnung auf Grundlage der europäischen Norm DIN EN 16258 vollzogen.

4 Streckenbeschreibung

4.1 Langstrecke: Shanghai nach Hamburg

Für die Betrachtung einer Langstrecke fiel die Wahl auf die Interkontinentalverbindung zwischen China und Deutschland mit dem Start in Shanghai und dem Endpunkt in Hamburg. Die Strecke wurde aufgrund ihrer hohen Bedeutung sowohl im deutschen als auch internationalen Handel gewählt: Die Volksrepublik China ist mit fast 15 Prozent aller Exporte der größte Exporteur von Handelswaren weltweit (Nicita & Razo, 2021) und ist gleichzeitig der stärkste Handelspartner Deutschlands (statistisches Bundesamt, 2023b). Der Hafen Shanghai ist der weltweit größte Containerhafen mit einem Umschlagvolumen von rund 47 Millionen TEU im Jahr 2021 (Alphaliner, 2022) und wurde aufgrund seiner daraus folgenden globalen Relevanz als genauer Startpunkt in China gewählt.

Deutschland mit Hamburg als Endpunkt wurde deshalb gewählt, da die Betrachtung von interkontinentalem Handel für das Unternehmen ctrl+s GmbH von Interesse ist und Kunden der ctrl+s GmbH überwiegend Unternehmen darstellen, die ihren Hauptsitz und Absatzmarkt in Deutschland haben. Daher ist eine eurozentrische Perspektive von Relevanz für die Unternehmen. Zusätzlich ist der Hamburger Hafen mit einem gesamten Güterumschlag von rund 111 Millionen Tonnen im Jahr 2021 der größte Seehafen Deutschlands (statistisches Bundesamt, 2023a) und wird als die „Drehscheibe für China-Verkehre in Europa“ angesehen (trans.info, 2019). Hamburg gilt unter anderem als „einer der wichtigsten Standorte in Deutschland für den Schienengütertransport aus und nach China“ (IHK Hamburg, 2019.)

Besonders interessant wird die gewählte Strecke durch ihren handelspolitischen Hintergrund: Die im Jahr 2013 erstmals von der chinesischen Regierung vorgestellte „Belt and Road Initiative“ (MERICS Mercator Institute for China Studies, 2018) oder auch „One Belt One Road“, im deutschen Sprachraum bekannter unter dem Begriff der „neuen Seidenstraße“ ist ein außenpolitisches Konzept zur Verbindung des asiatischen Wirtschaftsraumes (mit China im Zentrum) mit Europa und Afrika (IHK Hamburg, 2019). Viele Bauprojekte im Straßen- und Eisenbahnstreckennetz werden gefördert sowie die Schifffahrtstraße ausgebaut. Der „Gürtel“ steht dabei für sechs Landwege, der Begriff der „Straße“ ist repräsentativ für die verschiedenen Seeverbindungen (vgl. Abbildung 4) (B. Kuhn, 2019).

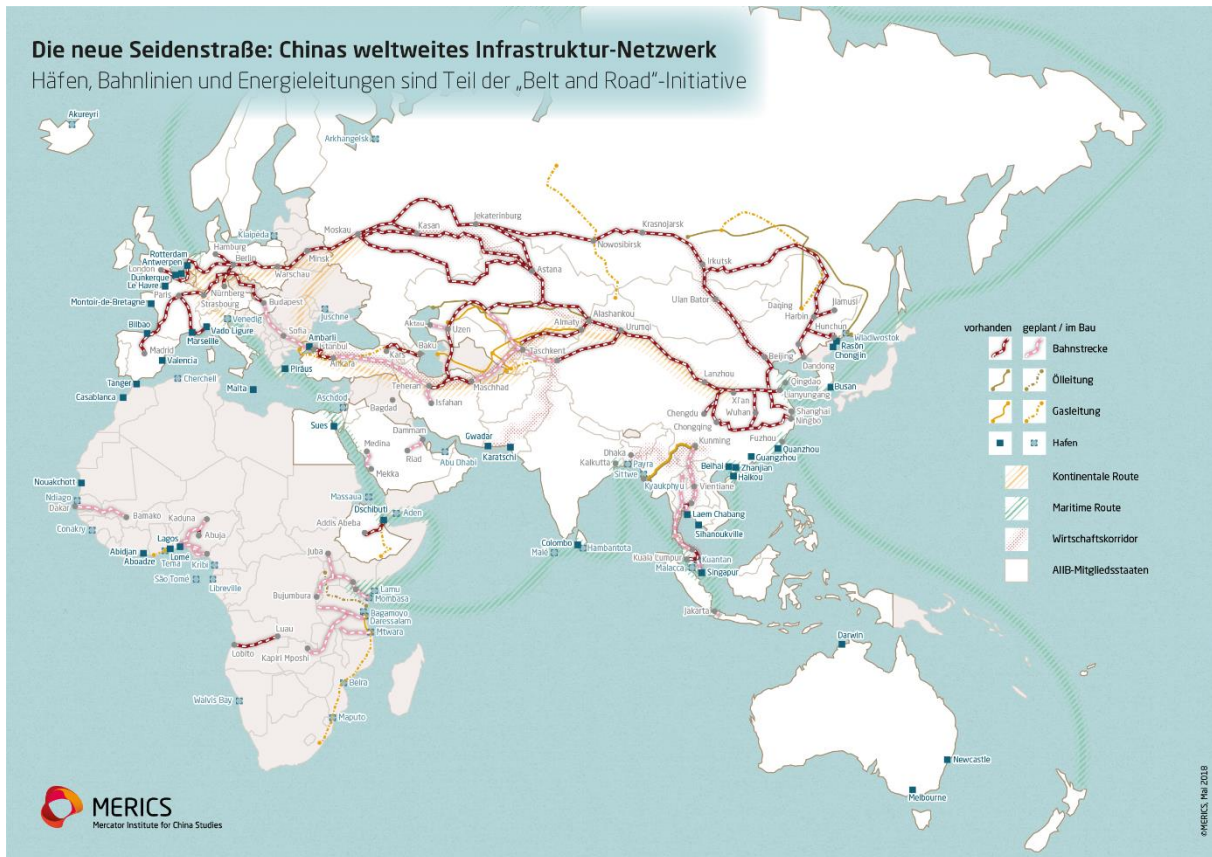


Abbildung 4: Die neue Seidenstraße: Chinas weltweites Infrastruktur-Netzwerk. Quelle: (MERICS Mercator Institute for China Studies, 2018)

4.1.1 Wasserstraße

Zu einem großen Teil erfolgt der Transport per Schiff über den Seekorridor der neuen Seidenstraße. In Abbildung 5 wird die im Transportsektor übliche Schiffsroute für den Weg von Shanghai nach Hamburg visualisiert. Die Strecke mit Angabe der verschiedenen Transportdienstleister kann über die Internetanwendung des niederländischen Logistikdienstes Routescanner eingesehen werden, in dem der Start- und Zielort, sowie das Transportmittel ausgewählt wird. Der gewünschte Transport kann ohne Transfers an anderen Häfen ablaufen, erstreckt sich über eine Entfernung von 20.037 km und dauert rund 35 Tage (Routescanner, 2022).

Die Strecke startet vom Shanghai International Port an der Mündung des Yangtze Fluss im ostchinesischen Meer vorbei an Taiwan weiter durch das südchinesische Meer bis durch die Straße von Singapur, weiter über die Straße von Malakka . Vorbei an Sri Lanka verläuft der Seeweg durch das Arabische Meer und passiert den Golf von Aden. Weiter geht es durch den Bab al-Mandab, eine Meeresstraße zwischen Dschibuti auf der Seite des afrikanischen Kontinents und dem Jemen. Mündend im Roten Meer verläuft die Strecke durch den Suezkanal und durchquert das Mittelmeer, vorbei an Griechenland und Italien auf der Seite des europäischen Kontinents, und Algerien und Marokko auf der Seite des afrikanischen Kontinents. Sie durchläuft die Straße von Gibraltar und führt

weiter an der Atlantikküste von Portugal und Frankreich entlang, durch den Ärmelkanal weiter durch die Straße von Dover, welche den Ärmelkanal mit der Nordsee verbindet. Durch die Elbmündung kann das Schiff auf dem Transportweg in den Hamburger Hafen einlaufen. Hier endet der betrachtete Seeweg. Abbildung 5 zeigt den Streckenverlauf auf der geographischen Karte an.

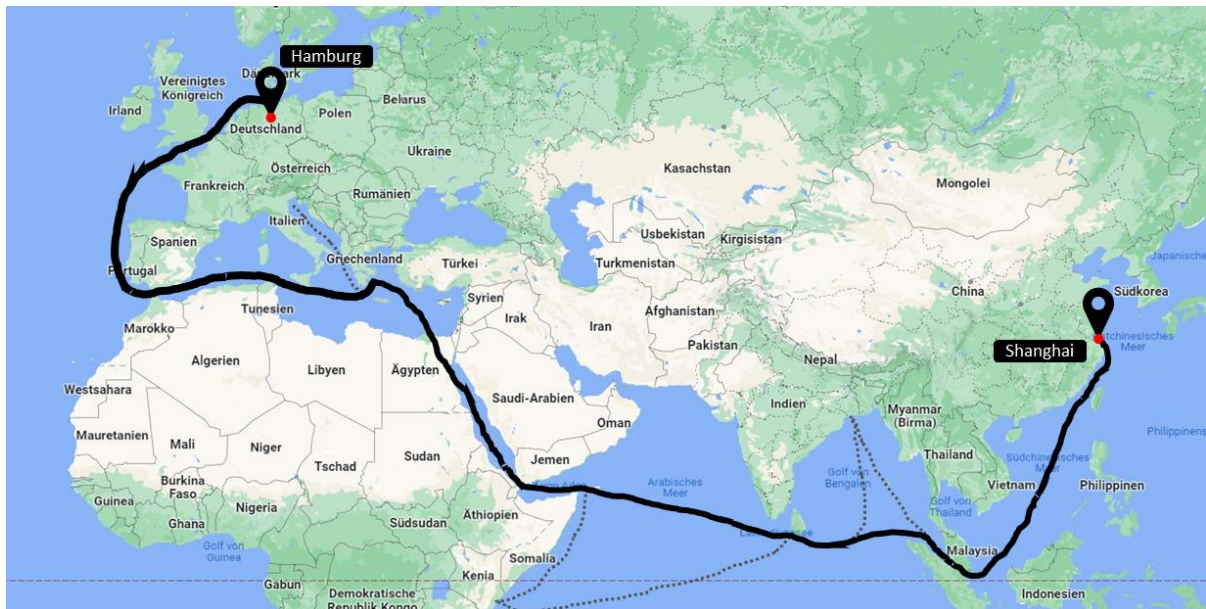


Abbildung 5: Seeweg von Shanghai nach Hamburg. Die durchgezogene Linie zeigt die tatsächliche Strecke an, die gestrichelten Linien markieren den Weg der maritimen Seidenstraße. Es ist ersichtlich, dass ein Großteil des Transportwegs entlang der maritimen Seidenstraße verläuft. Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage des Online-Kartendienstes Google Maps. In Anlehnung an die Visualisierung des Logistikdienstes Routescanner (Routescanner, 2022) und MERICS Mercator Institute for China Studies (2018)

Im Folgenden werden die Streckenbedingungen auf der Wasserstraße näher beleuchtet. Zu betrachtende Aspekte sind sowohl die jeweilige Wassertiefe an den Häfen von Shanghai und Hamburg als auch mögliche Restriktionen auf den Meeresstraßen und Schiffskanälen bezüglich Schiffsbreite und Schiffstiefe. Dies sind wichtige Betrachtungspunkte, da die Wassertiefe und Fahrrinnenbreite an den Häfen und Wasserstraßen darüber entscheiden, über welche Größe und damit welche Transportkapazität Schiffe verfügen dürfen, die diese Passagen durchqueren müssen. Für die vorliegende Arbeit gehört die Transportkapazität der jeweiligen Transportmittel zu den ausschlaggebendsten Faktoren dafür, wie hoch die Emissionsintensität jedes Verkehrsträgers ausfällt. Der Shanghai International Port setzt sich aus mehreren Hafenabschnitten zusammen. Da die Wassertiefe für größere Containerschiffe im Bereich der Häfen auf dem Festland Shanghais unzureichend war, wurde der Bau eines Tiefwasserhafens in Angriff genommen. Der Ende des Jahres 2017 fertiggestellte Tiefwasserhafen Yangshan liegt im ostchinesischen Meer und ist mit einer 32,5 km langen Brücke mit dem Festland verbunden. An den Terminals liegt die Wassertiefe bei 16 Metern (Ship Technology, 2020). Die Straße von Malakka erstreckt sich über circa 800 Kilometer und ist an der

schmalsten Stelle rund 18 Kilometer breit und an ihrer seichtesten Stelle knapp 25 Meter tief (Ghazvinei et al., 2018, S. 2). Die Meeresstraße Bab-Al-Mandab hat eine Länge von fast 150 Kilometern. An der schmalsten Stelle bemisst die Meeresstraße ungefähr 20 Kilometer und an ihrer seichtesten Stelle ist der Bab-Al-Mandab 50 Meter tief (Jarosz et al., 2005). Der Suezkanal ist ein künstlich angelegter Schiffskanal, der eine Verbindung zwischen dem Roten Meer und dem Mittelmeer schafft. Der Kanal ist über 193 Kilometer lang, zwischen 280 und 345 Meter breit und 24 Meter tief (Capital & Maritime Executive, 2022). Die Straße von Gibraltar trennt den afrikanischen Kontinent vom europäischen Kontinent. Die Meeresstraße ist an ihrer schmalsten Stelle 15 Kilometer breit und knapp 300 Meter tief (Garrett et al., 1990). Die Straße von Dover bezeichnet die schmalste Stelle des Ärmelkanals und hat eine Breite von 31 bis 40 Kilometer; hier beträgt die Wassertiefe an der seichtesten Stelle rund 26 Meter (Woitschütze, 2013, S. 458), (UK Hydrographic Office, 2016, S. 3). Durch die Fahrrinnenanpassung der Elbe vor dem Hafen Hamburgs, die Ende Januar 2022 abgeschlossen wurde, können einkommende Schiffe „[...] eine zulässige Fahrrinntiefe bis zu 16,10 Meter“ auf der Flutwelle nutzen. Die Fahrrinnenbreite bemisst an der schmalsten Stelle der Elbe 250 Meter (Port of Hamburg, 2023b).

Tabelle 4: schmalste Stellen und Wassertiefen der Häfen Shanghai und Hamburg sowie den Meeresstraßen, die Containerschiffe zwischen Start- und Zielhafen passieren müssen.

Hafen/ Meeresstraße	Schmalste Breite [m]	Seichteste Stelle [m]
Hafen Shanghai	-	16
Straße von Malakka	18.000	25
Bab-Al-Mandab	20.000	50
Suezkanal	280	24
Straße von Gibraltar	15.000	300
Straße von Dover	31.000	26
Hafen Hamburg	250	16

Es zeigt sich, dass der Hafen Hamburg mit seiner Fahrrinnenbreite und Wassertiefe der limitierende Faktor für die Größe und somit der Transportkapazität des Containerschiffs darstellt. Laut Statistiken des Hamburger Hafen ist es vor allem seit der Fahrrinnenanpassung möglich, Großcontainerschiffe mit einer Stellplatzkapazität von 18.000 bis 24.000 TEU anlaufen zu lassen (Port of Hamburg, 2023c), (Port of Hamburg, 2023d). Im weiteren Verlauf wird eine Kapazität von 20.000 TEU angenommen. Um die Transportkapazität in Tonnen zu ermitteln, wird ein Konversionsfaktor von 10 Tonnen pro TEU angenommen, welcher aus der ISO Norm 14083 entnommen wird. Der für Containerschiffe verwendete Kraftstoff ist Schweröl (HFO, heavy fuel oil).

In Tabelle 5 werden zusammenfassend die für die spätere Emissionsberechnung benötigten Angaben aus dem vorliegenden Abschnitt gelistet.

Tabelle 5: Transportlänge der Schiffsroute sowie Transportkapazität und Antrieb des Containerschiffs auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.

Parameter	Containerschiff	Quelle
Transportlänge [km]	20.037	(Routescanner, 2022)
Transportdauer [d]	35	(Routescanner, 2022)
Transportkapazität [TEU]	20.000	Vgl. (Port of Hamburg, 2023c)
Transportkapazität [t]	200.000	Anwendung des Konversionsfaktors von 10 Tonnen pro TEU nach ISO 14083
Antrieb	Schweröl (HFO)	(Umweltbundesamt, 2019b)

4.1.2 Flugstrecke

Nach der Recherche von Flugrouten zwischen dem Shanghai Pudong International Airport (PVG) zum Hamburg Helmut Schmidt Flughafen (HAM) muss davon ausgegangen werden, dass keine Direktverbindungen zwischen den beiden Flughäfen bestehen. Nach der Internetanwendung des Softwareanbieters Fluent Cargo, welches sofortige Übersichten über mögliche Routen zwischen gewähltem Start- und Endpunkt bereitstellt, gibt es die beiden Möglichkeiten, eine Flugroute ab PVG bis zum Flughafen Frankfurt am Main (FRA) und anschließend ab FRA aus nach HAM zu wählen, oder die Fracht ab PVG bis zum Amsterdam Airport Schiphol (AMS) und im Anschluss ab AMS nach HAM zu transportieren. Für den weiteren Transport der Fracht ausgehend vom Flughafen Hamburg sind es auf die Autobahn A7 noch rund sieben Kilometer, bis zum Hamburg Hauptbahnhof noch elf Kilometer. Diese Strecken werden jedoch aufgrund der fehlenden Relevanz in der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Weitere von Fluent Cargo vorgeschlagene Routen führen von FRA zum Flughafen Bremen (BRE) oder zum Flughafen Hannover (HAJ) und von dort aus jeweils mit dem Lkw nach Hamburg (Fluent Cargo, 2023a). Weiterhin wird der Vor- und Nachlauf in der konventionellen Luftfracht seltener mit dem Flugzeug, sondern zum größten Teil mit Lkw auf dem Landweg organisiert (IHK München, 2018), wie Abbildung 6 zeigt.



Abbildung 6: schematische Darstellung des Luftfrachtprozesses in der konventionellen Fracht. Quelle: (IHK München, 2018)

Da in der vorliegenden Arbeit jedoch kein multimodaler Transport, sondern jedes Transportmittel und dessen jeweilige Route möglichst alleinstehend betrachtet werden soll, werden im weiteren Verlauf ausschließlich die Flüge von PVG nach AMS und FRA nach HAM thematisiert. Die zu betrachtende Flugroute wird in Abbildung 7 dargestellt.

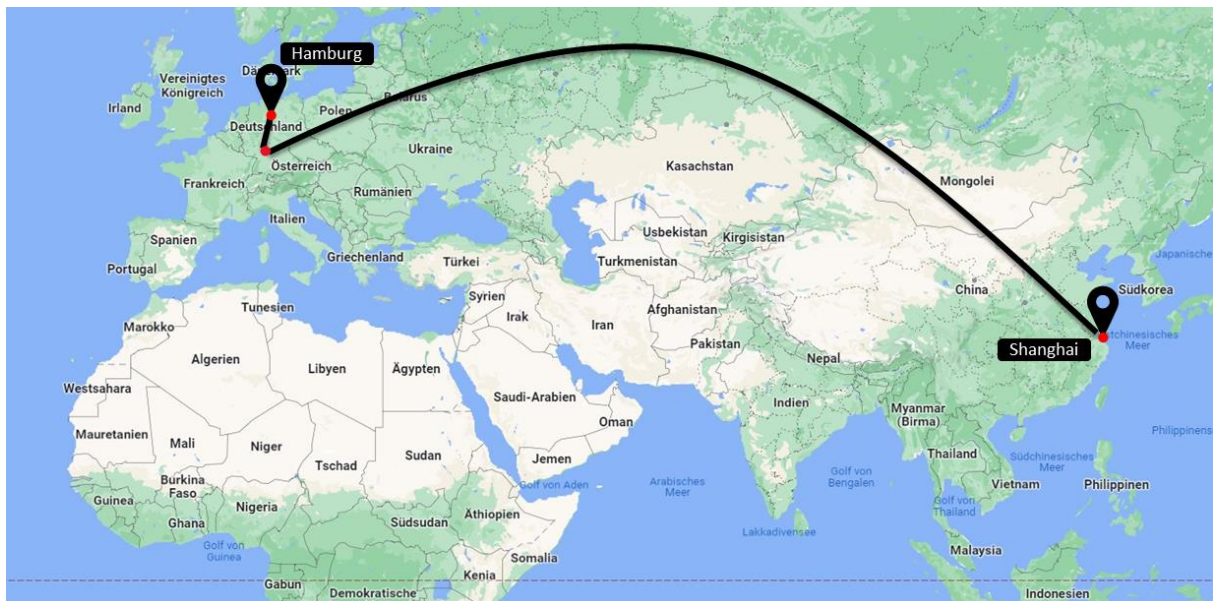


Abbildung 7: Flugweg von Shanghai (PVG) nach Hamburg (HAM) über Frankfurt am Main (FRA). Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage des Online-Kartendienstes Google Maps. In Anlehnung an die Visualisierung des Logistikdienstes Fluent Cargo (Fluent Cargo, 2023a)

Die Transportkapazitäten in der Luftfracht unterscheiden sich erheblich darin, in welchem Flugzeugtyp die Fracht transportiert wird. Unterschieden wird in zwei Hauptkategorien, den Frachtflugzeugen und den Belly-Transport in Passagierflugzeugen (Lufthansa Cargo,). Da die Frachtkapazitäten in Flugzeugen allgemein nicht vergleichbar zu anderen Beförderungsmitteln sind, wurde hier das Frachtflugzeug gewählt, um die maximal mögliche Transportmenge auf der Luftstrecke zu wählen. Um einen Vergleich zwischen dem Langstrecken- und Kurzstreckenflug möglich zu machen, wurde hier das

Frachtflugzeugmodell Boeing B777F der Lufthansa Cargo ausgewählt, das auch Langstrecken auch ohne Zwischenlandung überwinden kann (Lufthansa Cargo, 2023b). Alle Kennzahlen für die Flugstrecke zwischen Shanghai und Hamburg finden sich in Tabelle 6.

Tabelle 6: Transportlänge der Luftroute sowie Transportkapazität und Antrieb des Frachtflugzeugs auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.

Parameter	Flugzeug	Quelle
Transportlänge [km]	9.270	(Fluent Cargo, 2023a)
Transportdauer [h]	19,2	(Fluent Cargo, 2023a)
Transportkapazität [TEU]	-	-
Transportkapazität [t]	103	(Lufthansa Cargo,)
Antrieb	Kerosin	-

4.1.3 Straße

Von Shanghai verläuft die Strecke über die Fernverkehrsstraße auf Provinzebene S5 und führt über die Autobahn G4221 in die Provinz Jiangsu auf die Autobahn G42. In Höhe der Stadt Nanjing geht es weiter auf die G36, um anschließend auf die Fernverkehrsstraße S12 in der Provinz Anhui zu wechseln, weiterführend auf die S38 in der Provinz Henan zu wechseln, bevor diese erneut auf eine Autobahn G40 führt, welche in die Provinz Shaanxi führt. Nahe der Stadt Xianyang wechselt die Route auf die Autobahn G70 in die Provinz Gansu, von dort aus über die G22 auf die G30 quer durch die Provinz Gansu bis in das autonome Gebiet Xinjiang. Ein kurzer Wechsel auf die Provinzstraße S238 führt auf eine der in Peking beginnenden Autobahnen G7, bis vor Changji. Ab hier folgt die Route der Autobahn G335 und wechselt schließlich auf die G3014 und mit jeweils kurzen Abschnitten auf den Autobahnen und Fernverkehrsstraßen G217, S229 und G219 (Der Reiseführer, 2018b). Über die S319 erfolgt der Eintritt nach Kasachstan in das Gebiet Abai. Über die internationalen Fernstraßen M-28 und M-38 führt die Strecke in das Gebiet Pawlodar. Weiter verläuft die Route auf der Fernstraße A17 über die regionale Fernstraße P4 in das Gebiet Aqmola. Von dort aus führt die regionale Fernstraße P10 auf die internationale Strecke M-36 über weitere regionale Straßen R-262 und R-263 in das Gebiet Qostanai, bis die Route erneut auf die M-36 nach Russland führt (Der Reiseführer, 2018c). Die Europastraße 123 oder auch E12 führt im russischen Föderalbezirk Ural weiter auf die Autobahn M5, bis die Route im Föderalbezirk Wolga in der Nähe der Stadt Ufa auf die M7 wechselt, die auch im Föderalbezirk Zentralrussland verläuft. Über einen kurzen Abschnitt auf der Fernstraße A1153 führt der Weg anschließend auf die Fernstraße M1, die Russland mit Belarus verbindet (Der Reiseführer, 2018d).

Die M1, oder auch die Europastraße 30 (E30), verläuft durch die weißrussischen Verwaltungsgebiete Wizebsk, Minsk und Brest. Anschließend führt die Strecke über die Regionalstraße P99 in das Verwaltungsgebiet Hrodna und von dort aus nach Polen (Der Reiseführer, 2018a). Über die polnische Schnellstraße S5 im Verwaltungsbezirk Podlachien wird die S8 erreicht, die in den Verwaltungsbezirk Masowien führt. Von hier aus führt die Route auf die Autobahn A2, die die Hauptstädte Warschau und Berlin verbindet (Polish Tourism Organisation, 2023). Über die A2 erfolgt der Eintritt nach Deutschland auf die Autobahn A12 in Brandenburg, weiter über die A10 auf die A24, die von Brandenburg über Mecklenburg- Vorpommern und Schleswig-Holstein bis nach Hamburg verläuft (Fluent Cargo, 2023a). Eine Übersicht des Streckenverlaufs zeigt Abbildung 8.

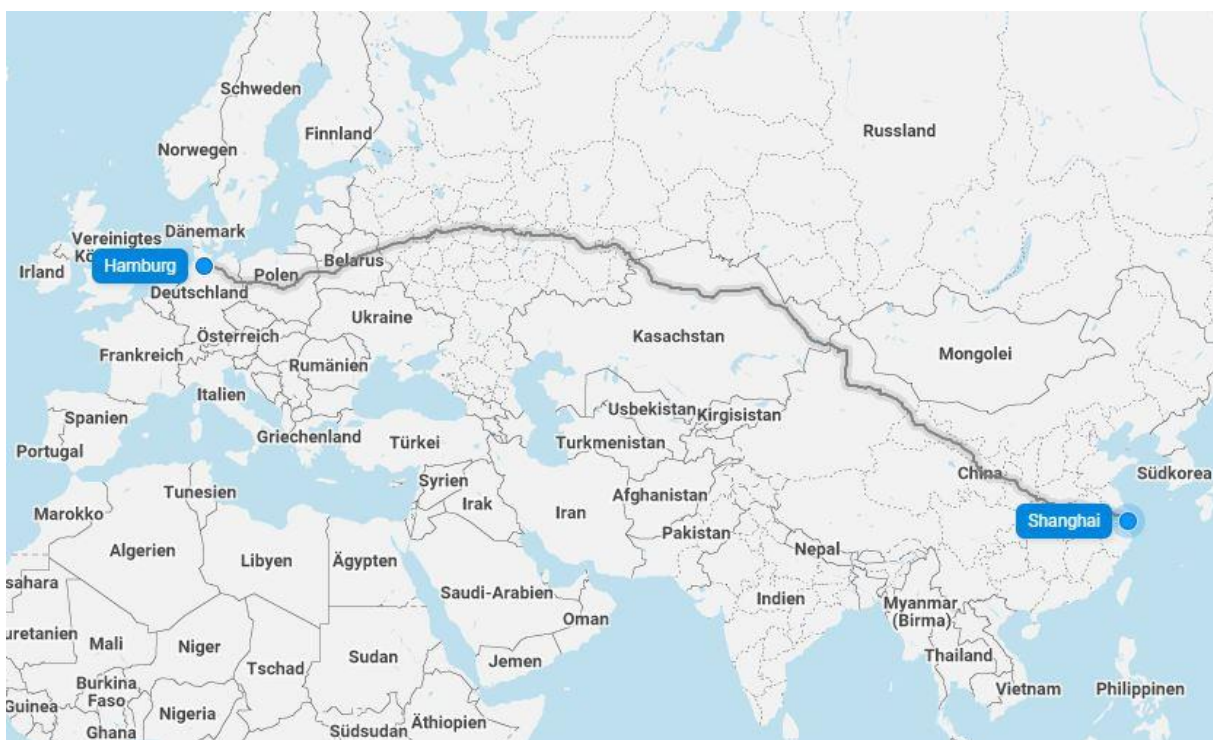


Abbildung 8: Straßenroute von Shanghai nach Hamburg. Quelle: (Fluent Cargo, 2023a)

Die Straßenroute zwischen Shanghai und Hamburg bemisst eine Länge von 10.605 Kilometer, die laut Fluent Cargo in vier Tagen und 23 Stunden via Lkw zurückgelegt wird. Hierbei sind jedoch keine Pausen für den Fahrzeugführer eingeschlossen; die Angabe zur Dauer bezieht sich folglich nur auf die zurückgelegte Strecke und der möglichen Durchschnittsgeschwindigkeit des Beförderungsmittels. Da 93 Prozent der Lkw in Deutschland Diesel als Kraftstoff tanken, wurde die Annahme getroffen, dass der Lkw-Transport allgemein hauptsächlich mit Diesel als Antrieb erfolgt (Kraftfahrtbundesamt, 2022). Das Ergebnis des Konversionsfaktors für die Ermittlung des transportierten Ladungsgewichts in Tonnen deckt sich auch mit der maximalen Zuladung eines 40-Tonner Lkw. Dieser weist ein Leergewicht von

13 Tonnen auf, sodass maximal 27 Tonnen Güter geladen werden können (Bußgeldkatalog 2023, 2023). In Tabelle 7 werden die Transportkennzahlen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 7: Transportlänge der Straßenroute sowie Transportkapazität und Antrieb des Lkw auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.

Parameter	Lkw	Quelle
Transportlänge [km]	10.605	(Fluent Cargo, 2023a)
Transportdauer [h]	119 ⁴	(Fluent Cargo, 2023a)
Transportkapazität [TEU]	2	(Port of Hamburg, 2023b)
Transportkapazität [t]	20	<i>Anwendung des Konversionsfaktors von 10 Tonnen pro TEU nach ISO 14083</i>
Antrieb	Diesel	(Kraftfahrtbundesamt, 2022)

4.1.4 Schiene

Rechercheergebnissen zufolge beschreibt der Begriff der neuen Seidenstraße weniger eine einzige Route, sondern mehr ein transnationales und interkontinentales Logistikkonzept, ausgehend von China, in welchem es mehrere Schienenwege gibt. Für die vorliegende Arbeit wurde daher eine Route gewählt, die repräsentativ für die „neue Seidenstraße“ steht und dem Streckenverlauf der Straßenverkehrsroute ähnelt.

Die Schienenstrecke startet in Shanghai und verläuft durch die chinesische Stadt Lanzhou in der Provinz Gansu weiter durch die Stadt Urumqi nach Alashankou im Autonomen Gebiet Xinjiang an der chinesisch-kasachischen Grenze. Von dort aus erreicht man die Stadt Astana in dem Gebiet Aqmola in Kasachstan. Weiter führt das Schienennetz über die kasachisch-russische Grenze nach Kasan im russischen Föderalbezirk Wolga bis nach Moskau, von dort aus die Route die Stadt Minsk in Belarus erreicht. Die Strecke verläuft anschließend über Warschau in Polen und erreicht letztendlich über Berlin das deutsche Ziel Hamburg (MERICS Mercator Institute for China Studies, 2018). Die beschriebene Strecke bemisst eine Länge von rund 10.720 Kilometer (Brenschede, 2013). Dabei benötigt der beladene Güterzug je nach Quelle zwischen 14 und 18 Tage, um die Strecke zurückzulegen (Stajerits, 2018), deshalb wird eine Transportdauer von 16 Tagen angenommen. Der Streckenverlauf wird in Abbildung 9 dargestellt.

⁴ Nicht berücksichtigt sind die Pausen für den Fahrzeugführer

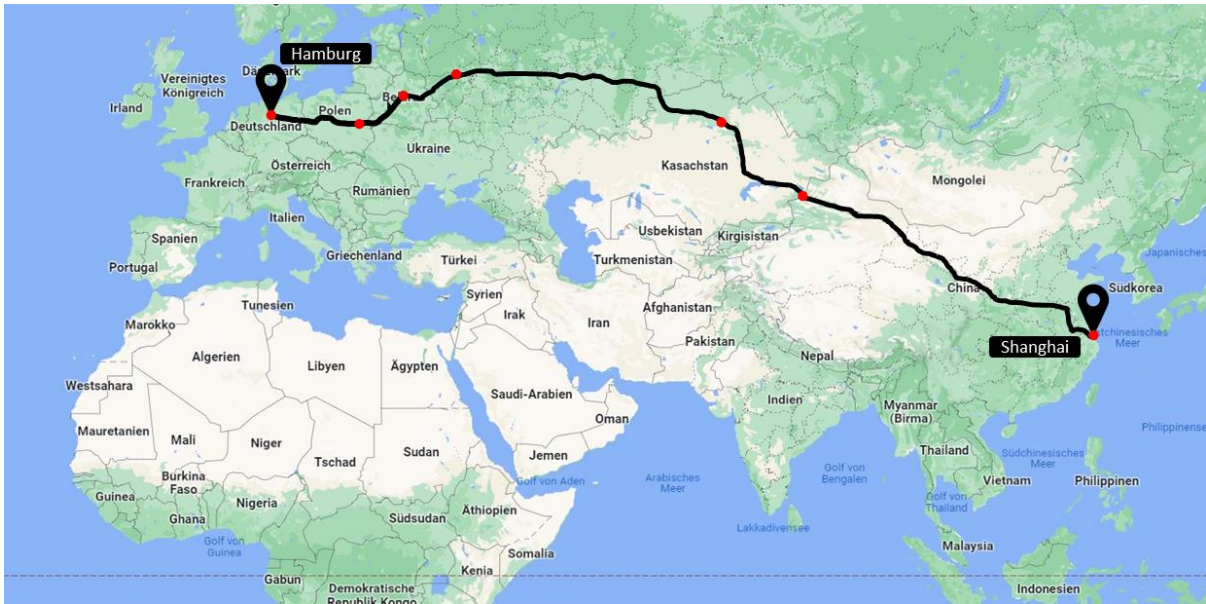


Abbildung 9: Landweg von Shanghai nach Hamburg über den Schienenverkehr. Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage des Online-Kartendienstes Google Maps. Auf Vorlage von (MERICS Mercator Institute for China Studies, 2018)

Um den Schienentransport in Shanghai zu beginnen, verfügt der International Port of Shanghai über eher begrenzte Eisenbahneinrichtungen: am Hafen existieren lediglich zwei Containerterminals, welche Zugbe- und entladestellen bereitstellen (Zhang et al., 2009). Auf dem Weg nach Deutschland muss im Laufe der Transportstrecke zwei Mal ein Spurwechsel erfolgen. Die Spurweite ist dabei definiert als „der Abstand zwischen den Schieneninnenkanten“ (FIS Mobilität und Verkehr, 2010) und gilt als der wichtigste Standard im Eisenbahnwesen. In weiten Teilen der Welt hat sich mit der Zeit die Normalspur mit einer Spurweite von 1.435 mm durchgesetzt und gilt mittlerweile als die europäische Regelspurweite. Abweichungen von der Normalspur gibt es unter anderem in den Staaten der ehemaligen Sowjetunion, häufig anzutreffen sind hierbei Breitspuren, das heißt Spurweiten, die einen größeren Abstand als die Normalspur haben. Die Spurweiten sind in Deutschland, Polen aber auch China mit 1.435 mm gleich; in Kasachstan, Russland und Belarus jedoch findet man die Breitspur von 1.520 mm vor (FIS Mobilität und Verkehr, 2010). Dies bedingt den zweimaligen Spurwechsel, einmal zwischen China und Kasachstan in Dostyk/Alanshankour, und das zweite Mal zwischen Belarus und Polen in Brest/Malasevicze (Sucky et al., 2019). Der Spurwechsel hat Auswirkungen auf die Transportdauer, da der Güterzug nicht die gesamte eurasische Strecke durchfahren kann (Stajerits, 2018). Da für die spätere Emissionsberechnung jedoch lediglich die Entfernung in Kilometer und nicht die Zeit relevant ist, die für das Zurücklegen der Strecke benötigt wird, wird der Spurwechsel nicht näher thematisiert.

Der Transport kann letztendlich auf den Schienen der Hamburger Hafenbahn (Port of Hamburg, 2023a) beendet werden. Als führender Eisenbahnhafen in Europa verfügt der Hamburger Hafen an allen

Containerterminals über Umschlaganlagen, die an das Schienennetz angeschlossen sind (Port of Hamburg, 2023a).

Limitierender Faktor für die Gütermenge, die pro Güterzug transportiert werden kann, ist das deutsche Schienennetz, welches bisweilen nur teilweise für Güterzüge mit einer Länge von 740 Metern ausgelegt ist (vgl. Abschnitt 3.3.4). Abbildung 10 zeigt den aktuellen Stand sowie den geplanten Ausbau des 740 Meter-Netzes in Deutschland.

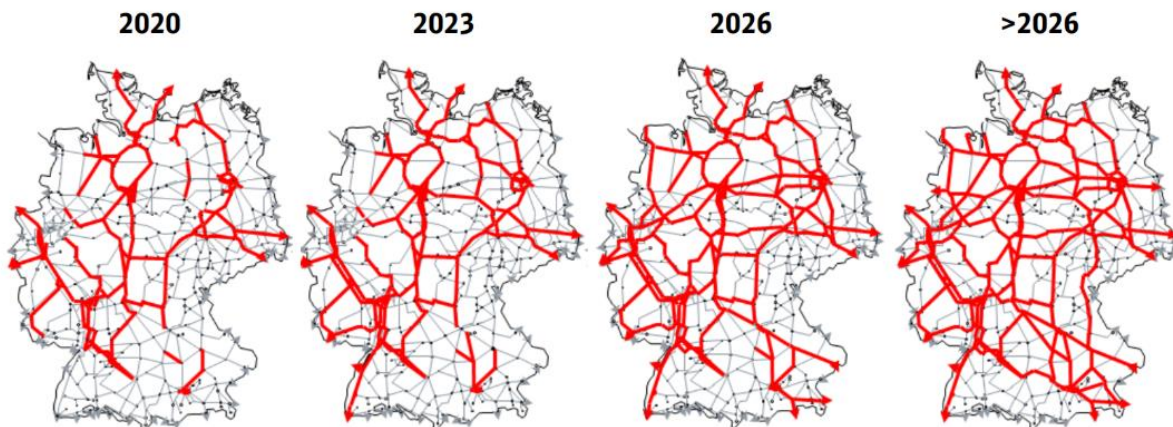


Abbildung 10: geplanter Ausbau des 740 Meter-Netzes durch die DB Netz AG bis 2030. Quelle: (FIS Mobilität und Verkehr, 2019)

Im weiteren Verlauf wird die Annahme getroffen, dass das Schienennetz von der deutsch-polnischen Grenze bis nach Hamburg bereits auf Güterzüge mit einer Länge von 740 m ausgelegt ist (vgl. Abbildung 10, Karte von 2023), sodass eine Transportkapazität von 104 TEU vorliegt (Allianz pro Schiene, 2016). Die Anwendung des Konversionsfaktors nach ISO 14083 resultiert in einer Transportkapazität von 1.040 Tonnen. Tabelle 8 zeigt eine Übersicht der betrachteten Parameter.

Tabelle 8: Transportlänge der Schienenroute sowie Transportkapazität und Antrieb des Güterzugs auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.

Parameter	Güterzug	Quelle
Transportlänge [km]	10.721	(Brenschede, 2013)
Transportdauer [d]	16	Vgl. (Stajerits, 2018)
Transportkapazität [TEU]	104	(Allianz pro Schiene, 2016)
Transportkapazität [t]	1.040	Anwendung des Konversionsfaktors von 10 Tonnen pro TEU nach ISO 14083
Antrieb	Strom	Annahme

Es wird angenommen, dass der Gütertransport mit elektrisch betriebenen Eisenbahnen bewerkstelligt wird. Diese Annahme wird auf Basis der hohen Elektrifizierungsgrade von Eisenbahnen in China und Deutschland, sowie der Durchfahrtsländer getroffen. Für die spätere Emissionsberechnung muss im weiteren Verlauf auch der Anteil an Erneuerbaren Energien (EE) am Bahnstrommix der Länder betrachtet werden. Alle Angaben finden sich für jedes Land entlang der Strecke in Tabelle 9.

Tabelle 9: Elektrifizierungsgrad und Anteil an EE am Bahnstrommix in Prozent für die Durchfahrtsländer sowie China und Deutschland.

Land	Elektrifizierungsgrad [%]	Quelle	Anteil an EE am Bahnstrommix [%]	Quelle
China	73,3	(China Government Network, 2022)	24,1	(IEA & UIC, 2017)
Kasachstan	26,4	Vgl. (OECD Stat, 2018)	12,44 ⁵	(Ritchie et al., 2022)
Russland	50,9	Vgl. (OECD Stat, 2018)	16,1	(IEA & UIC, 2017)
Belarus	22,5	Vgl. (OECD Stat, 2018)	2,9 ⁶	(Ritchie et al., 2022)
Polen	67,3	Vgl. (OECD Stat, 2018)	19 ⁷	(Fraunhofer ISE, 2023)
Deutschland	89,3	(BMDV, 2021)	62,4	(DB, 2023)

⁵ Keine Daten zum Bahnstrommix verfügbar, deshalb Anteil am gesamten Strommix

⁶ Keine Daten zum Bahnstrommix verfügbar, deshalb Anteil am gesamten Strommix

⁷ Keine Daten zum Bahnstrommix verfügbar, deshalb Anteil am gesamten Strommix

4.2 Kurzstrecke: Rotterdam nach Duisburg

Für die Wahl einer Kurzstrecke wurde betrachtet, welcher der stärkste europäische Handelspartner Deutschlands ist. Gleichzeitig sollte es, wie auch bei Betrachtung der Langstrecke, auf der Handelsstrecke ein möglichst vielfältiges Angebot an unterschiedlichen Transportmitteln geben, die in der vorliegenden Arbeit beleuchtet werden können. In Folge der aufgestellten Kriterien fiel die Entscheidung auf die Niederlande: Mit 15 Prozent aller Importe nach Deutschland ist das Nachbarland der größte Importpartner und mit sieben Prozent aller Exporte der drittgrößte Exportpartner (Eurostat, 2021). Außerdem bietet die Strecke von Rotterdam nach Duisburg die Möglichkeit, sowohl den Transport auf der Straße, über die Schiene als auch über den Wasserweg zu betrachten. Der Hafen in Rotterdam ist dabei der größte Containerhafen Europas mit einem Containerumschlag von über 15 Millionen TEU im Jahr 2021 (Port of Rotterdam, 2023) und auch Duisburg bildet als größter Containerbinnenhafen der Welt mit einem Containerumschlag von 4,3 Millionen TEU im Jahr 2021 einen wichtigen trimodalen Verkehrsknoten mit Anschluss an die Binnenschifffahrt, dem Schienen- und Straßenverkehr (Duisport AG, 2023).

4.2.1 Wasserstraße

Vom Hafen Rotterdam am Rhein-Maas-Delta startet die Binnenwasserstraße in der Provinz Südholland und führt auf dem Fluss Merwede in die Provinz Gelderland in den Fluss Waal, einer der Mündungsarme des Rheins. Auf Höhe der niederländischen Gemeinde Millingen am Rhein führt die Strecke in den Rhein und überquert die niederländisch-deutsche Grenze. Die Route folgt dem Flusslauf des Rheins durch Nordrhein-Westfalen, bis der Duisburger Hafen an der Ruhr, einem Nebenfluss des Rheins, erreicht wird (Schwantje, 2021), (Routescanner, 2023a). Insgesamt bemisst der Binnenwasserweg eine Länge von 218 Kilometer, für welche ein Binnenschiff laut Routescanner rund zwölf Stunden benötigt, um die Strecke zurückzulegen. Abbildung 11 visualisiert den oben beschriebenen Streckenverlauf.



Abbildung 11: Streckenverlauf auf den Binnenwasserstraßen zwischen dem Hafen Rotterdam und dem Hafen Duisburg. Quelle: (Routescanner, 2023a)

Rund 38 Prozent der Containertransporte zwischen dem Hafen in Rotterdam und dem europäischen Hinterland erfolgen über den Transport via Binnenschiff (Port of Rotterdam, 2023). Der Rhein ist zwischen Rheinfelden bei Basel und der Nordsee auf einer Länge von 884 Kilometer schiffbar und gehört zu den verkehrsreichsten Wasserstraßen weltweit (Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, 2023). Die Beschränkungen auf den Wasserstraßen beziehen sich in der Binnenschifffahrt auf noch mehr Faktoren als in der Seefahrt. Zu bestimmende Faktoren um zu prüfen, „[...] ob und unter welchen Bedingungen ein Schiff einen bestimmten Wasserstraßenabschnitt passieren kann“ (Renner & Bialonski, 2004, S. 12) sind neben der vorhandenen Wassertiefe und -breite auch die Beschränkungen durch Brückendurchfahrtshöhen (Renner & Bialonski, 2004, S. 12).

Die Einschränkungen auf der Wasserstraße am Deltarhein und Niederrhein zwischen Rotterdam und Duisburg sind so gering, dass hier Schiffe mit einer Länge bis 135 Meter, einer Breite bis circa 22,80 Meter und mit einem Tiefgang⁸ zwischen 2,50 Meter bis vier Meter fahren können. Die entlang der Strecke zu passierenden Brücken haben eine durchschnittliche Durchfahrtshöhe von rund 9,10 Meter über HSW (Höchster schiffbarer Wasserstand) und bieten damit genügend Platz, dass die Container auf den Schiffen über das ganze Jahr mindestens vierlagig übereinander gestellt werden können (Renner & Bialonski, 2004). Damit ist der Einsatz großer Containerschiffe (Rjinmax) mit einer Länge von 135 Meter, einer Breite von 17,20 Meter und einem Tiefgang von 3,50 Meter möglich. Dieser Schiffstyp weist ein Ladevermögen von 500 TEU auf (Informationsstelle Binnenschifffahrt, 2021).

Im Gegensatz zu marinen Containerschiffen werden die meisten Binnenschiffsmotoren mit Dieselkraftstoff angetrieben (Dahlke-Wallat et al., 2022, S. 4). Alle relevanten Angaben sind in Tabelle 13 nochmals zusammenfassend dargestellt.

⁸ Der Tiefgang beschreibt die Entfernung zwischen Wasseroberfläche und tiefstem Punkt eines Schiffs. Quelle Port of Hamburg (2023).

Tabelle 10: Transportlänge der Schiffsroute sowie Transportkapazität und Antrieb des Binnenschiffs auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg.

Parameter	Binnenschiff	Quelle
Transportlänge [km]	218	(Routescanner, 2023a)
Transportdauer [h]	12	(Routescanner, 2023a)
Transportkapazität [TEU]	500	(Informationsstelle Binnenschiffahrt, 2021)
Transportkapazität [t]	5.000	<i>Anwendung des Konversionsfaktors von 10 Tonnen pro TEU nach ISO 14083</i>
Antrieb	Diesel	(Dahlke-Wallat et al., 2022)

4.2.2 Flugstrecke

Da es in Duisburg keinen Flughafen gibt und in der vorliegenden Arbeit lediglich existierende Flugrouten mittels Flugzeug und keine individuellen Flüge mit dem Helikopter betrachtet werden, muss für die Streckenberechnung im weiteren Verlauf der nächstgelegene Flughafen Düsseldorf (DUS) herangezogen werden (Übersichtskarte Deutschland, 2013).

Nach der Recherche von Flugrouten zwischen dem Rotterdam den Haag Flughafen (RTM) zum Flughafen DUS muss davon ausgegangen werden, dass keine Direktverbindungen zwischen den beiden Flughäfen bestehen. Nach der Internetanwendung des Softwareanbieters Fluent Cargo ist die kürzeste Verbindung zwischen Rotterdam und Duisburg die Flugroute ab dem Flughafen Amsterdam Schiphol bis zum Flughafen Düsseldorf. Für den weiteren Transport der Fracht ausgehend vom Flughafen Düsseldorf sind es laut Fluent Cargo bis nach Duisburg über die Bundesstraße B8 und der Autobahn A59 noch rund 18 Kilometer. Die Strecke zwischen dem Hafen Rotterdam und dem Flughafen Amsterdam Schiphol verläuft mittels Straßengüterverkehr von der A15 über die A20 auf der A4 und umfasst 80 Kilometer (Fluent Cargo, 2023b). Der beschriebene Streckenverlauf kann in Abbildung 12 eingesehen werden.



Abbildung 12: Flugroute zwischen dem Flughafen Amsterdam Schiphol und dem Flughafen Düsseldorf, mit vorgelagertem Straßentransport von Rotterdam nach Amsterdam und nachgelagertem Straßentransport von Düsseldorf nach Duisburg. Quelle: (Fluent Cargo, 2023b)

Nach dem Lkw-Transport von Rotterdam nach Amsterdam wird die Fracht am zweitgrößten „[...] kontinentaleuropäische[n] Flughafen für konventionelle Fracht“ (IHK München, 2018, S. 24) geladen und auf den Weg nach Düsseldorf gebracht. Nach der Ankunft in Düsseldorf muss die Fracht aus dem Flugzeug und in einen Lkw geladen werden, der die Güter in die Empfängerstadt Duisburg transportiert. Die durchschnittliche Umschlagszeit beträgt jeweils circa zwölf Stunden. Insgesamt dauert der multimodale Transport ungefähr 25 Stunden (Fluent Cargo, 2023b).

Wie bereits in Abschnitt 3.3.2 erläutert, wurde auf beiden Strecken das Frachtflugzeugmodell Boeing B777F der Lufthansa Cargo ausgewählt, um die Vergleichbarkeit zwischen Lang- und Kurzstrecke zu gewährleisten. Die Besonderheit auf der Flugstrecke zwischen Rotterdam und Duisburg ist die Notwendigkeit des kombinierten Verkehrs: Da in Duisburg kein Flughafen angesiedelt ist und lediglich zwischen dem Flughafen Amsterdam Schiphol und dem Flughafen Düsseldorf Flugverbindungen existieren, muss die Fracht teilweise mit dem Lkw transportiert werden. Eine Übersicht über die Angaben zu den Transportkennzahlen via Lkw im Vor- und Nachlauf und mittels Flugzeug im Hauptlauf zeigt Tabelle 11.

Tabelle 11: Transportlänge der Flugroute sowie Transportkapazität und Antrieb des Frachtflugzeugs auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg.

Parameter	Flugzeug (Hauptlauf)	Quelle
Transportkapazität [t]	103	(Lufthansa Cargo, 2023b)

Parameter	Flugzeug (Hauptlauf)	Quelle
Transportlänge [km]	178	(Fluent Cargo, 2023b)
Antrieb	Kerosin	
	Lkw (Vor- und Nachlauf)	
Transportlänge [km]	98	(Fluent Cargo, 2023b)
Antrieb	Diesel	(Kraftfahrtbundesamt, 2022)
	gesamt	
Transportdauer	25 h	(Fluent Cargo, 2023b)

4.2.3 Straße

Von Rotterdam beginnt die Straßenroute auf der Autobahn A15 und führt im Ort Echteld in der Provinz Gelderland über die N323 auf die N322. Auf der Höhe auf der Höhe der Gemeinde Beuningen wechselt die Strecke auf die A73 von Gelderland durch die Provinz Brabant, bis sie in der Provinz Limburg auf die A77 führt. Über die Grenze nach Deutschland erreicht die niederländische Autobahn A77 den Anschluss zur Bundesautobahn A57. Am Autobahnkreuz Moers verläuft die Route weiter über die A40 bis zum Hafen Duisburg (Virgil Interactive GmbH, 2023) (Fluent Cargo, 2023b). Insgesamt beträgt die Straßenroute zwischen Rotterdam und Duisburg laut Fluent Cargo 220 Kilometer. Eine Übersicht des Streckenverlaufs findet sich in Abbildung 13.



Abbildung 13: Straßenverlauf von Rotterdam nach Duisburg. Quelle: (Fluent Cargo, 2023b)

Alle relevanten Angaben für den Straßengütertransport auf der Kurzstrecke werden in Tabelle 12 zusammenfassend aufgezeigt.

Tabelle 12: Transportlänge der Straßenroute sowie Transportkapazität und Antrieb des Lkw auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg.

Parameter	Lastkraftwagen	Quelle
Transportlänge [km]	220	(Fluent Cargo, 2023b)
Transportdauer [h]	3	(Fluent Cargo, 2023b)
Transportkapazität [TEU]	2	(Port of Hamburg, 2023b)
Transportkapazität [t]	20	Anwendung des Konversionsfaktors von 10 Tonnen pro TEU nach ISO 14083
Antrieb	Diesel	(Kraftfahrtbundesamt, 2022)

4.2.4 Schiene

Die Schienenstrecke startet im Rail Service Center Rotterdam (RSC) und verläuft nördlich von Dordrecht durch die Provinz Südholland in die Provinz Gelderland, immer südlich entlang des Rheins, vielmehr seiner niederländischen Mündungsarme. Kurz nach dem niederländischen Ort Babberich überquert die Schienenstrecke die niederländisch-deutsche Grenze, vorbei an der Stadt Emmerich am Rhein durch die Stadt Wesel, bis die Route auf der Höhe von Bottrop wieder die südöstliche Richtung einschlägt und schließlich das DUSS-Terminal (DUSS: Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene-Straße) am Duisburg-Ruhrort Hafen erreicht (Routescanner, 2023b). Der Streckenverlauf wird in Abbildung 14 dargestellt.



Abbildung 14: Landweg von Rotterdam nach Duisburg über den Schienenverkehr. Quelle: (Routescanner, 2023b)

Die Entfernung zwischen dem Rail Service Center Rotterdam bis zum DUSS-Terminal Duisburg-Ruhrort beträgt 206 Kilometer. Knapp drei Stunden benötigt der beladene Güterzug laut Routescanner, um diese Strecke zurückzulegen. Auch hier wird eine Transportkapazität von 104 TEU pro Güterzug angenommen. Tabelle 13 zeigt eine Übersicht der betrachteten Parameter.

Tabelle 13: Transportlänge, -dauer, durchschnittliche Geschwindigkeit und Transportkapazität der Schienenstrecke zwischen Rotterdam und Duisburg.

Parameter	Güterzug	Quelle
Transportlänge [km]	206 km	(Routescanner, 2023a)
Transportdauer [h]	2,85	(Routescanner, 2023a)
Transportkapazität [TEU]	104	(FIS Mobilität und Verkehr, 2019)
Transportkapazität [t]	1.040	Anwendung des Konversionsfaktors von 10 Tonnen pro TEU nach ISO 14083
Antrieb	Strom	-

Der jeweilige Elektrifizierungsgrad sowie der Anteil an Erneuerbaren Energien im Bahnstrommix der Niederlande und Deutschland sind in Tabelle 14 gelistet.

Tabelle 14: Elektrifizierungsgrad und Anteil an Erneuerbaren Energien am Bahnstrommix der Staaten Niederlande und Deutschland.

Land	Elektrifizierungs- grad [%]	Quelle	Anteil an EE am Bahnstrommix [%]	Quelle
Niederlande	75,6	(EU Transport in Figures, 2021)	100	(Niederlandse Spoorwegen, 2023)
Deutschland	89,3 ⁹	(BMDV, 2021)	62	(DB, 2023)

⁹ Schienenstrecken des Güterverkehrs

5 Ergebnisse der Emissionsberechnung

5.1 Langstrecke: Shanghai nach Hamburg

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der einzelnen Beförderungsmittel für die Strecke von Shanghai nach Hamburg hinsichtlich Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen vorgestellt. Die Berechnungen erfolgten dabei nach der in Kapitel 2 aufgezeigten Methodik; die dafür benötigten Werte wurden dabei den jeweiligen Abschnitten aus Kapitel 4 zur Streckenbeschreibung entnommen.

5.1.1 Wasserstraße

Die für die Berechnung des HFO-betriebenen Containerschiffs benötigten Werte finden sich in Tabelle 15.

Tabelle 15: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren für ein mit HFO betriebenes Containerschiff auf dem Seeweg von Shanghai nach Hamburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Transportlänge	$l_{\text{Transport}}$	20.037	Km
Transportkapazität	$k_{\text{Transport}}$	200.000	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(\text{VOS})$	280 ¹⁰	l/km
Energiefaktor TtW (HFO)	e_t	39,30	MJ/l
Energiefaktor WtW (HFO)	e_w	42,70	MJ/l
THG-Emissionsfaktor TtW (HFO)	g_t	3,05	Kg CO _{2e} /l
THG-Emissionsfaktor WtW (HFO)	g_w	3,31	Kg CO _{2e} /l

Die Berechnungen des Gesamtkraftstoffverbrauchs, der Transportleistung, der Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen wurden nach dem aufgezeigten Rechenweg in Abschnitt 2 durchgeführt und können im Anhang detailliert nachvollzogen werden. In Tabelle 16 werden die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 16: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen für ein HFO-betriebenes Containerschiff auf dem Seeweg von Shanghai nach Hamburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Gesamtkraftstoffverbrauch	$F(\text{VOS})$	5.610.360	l HFO
Transportleistung	T	4.007.400.000	tkm

¹⁰ nach Dagkinis und Nikitakos (2015);Achten (2016)

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Energieverbrauch TtW	E_t	220.487.148,0	MJ
Energieverbrauch WtW	E_w	239.562.372,0	MJ
THG-Emissionen TtW	G_t	17.111.598,0	Kg CO _{2e}
THG-Emissionen WtW	G_w	18.570.291,6	Kg CO _{2e}
Energieverbrauch pro tkm TtW	$E_t(T)$	0,055	MJ/tkm
Energieverbrauch pro tkm WtW	$E_w(T)$	0,060	MJ/tkm
THG-Emissionen pro tkm TtW	$G_t(T)$	0,004	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm TtW	$G_t(T)$	4,27	g CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	0,005	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	4,63	g CO _{2e} /tkm

5.1.2 Luftstrecke

Die für die Berechnung des kerosinbetriebenen Frachtflugzeugs benötigten Werte finden sich in Tabelle 17.

Tabelle 17: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren für ein mit Kerosin betriebenes Frachtflugzeug auf dem Luftweg von Shanghai nach Hamburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Transportlänge	$l_{\text{Transport}}$	9.270	Km
Transportkapazität	$k_{\text{Transport}}$	103	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(\text{VOS})$	20,40 ¹¹	l/km
Energiefaktor TtW (Kerosin)	e_t	35,30	MJ/l
Energiefaktor WtW (Kerosin)	e_w	42,00	MJ/l
THG-Emissionsfaktor TtW (Kerosin)	g_t	2,54	Kg CO _{2e} /l
THG-Emissionsfaktor WtW (Kerosin)	g_w	3,10	Kg CO _{2e} /l

Die Berechnungen des Gesamtkraftstoffverbrauchs, der Transportleistung, der Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen wurden nach dem aufgezeigten Rechenweg in Abschnitt 2 durchgeführt und können im Anhang detailliert nachvollzogen werden. In Tabelle 18 werden die Ergebnisse dargestellt.

¹¹ Nach Schmied und Knörr (2013, S. 12)

Tabelle 18: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen für ein kerosinbetriebenes Frachtflugzeug auf dem Luftweg von Shanghai nach Hamburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Gesamtkraftstoffverbrauch	F(VOS)	189.108	l Kerosin
Transportleistung	T	954.810	tkm
Energieverbrauch TtW	E_t	6.675.512,4	MJ
Energieverbrauch WtW	E_w	7.942.536	MJ
THG-Emissionen TtW	G_t	480.334,32	Kg CO _{2e}
THG-Emissionen WtW	G_w	586.234,8	Kg CO _{2e}
Energieverbrauch pro tkm TtW	$E_t(T)$	6,991	MJ/tkm
Energieverbrauch pro tkm WtW	$E_w(T)$	8,318	MJ/tkm
THG-Emissionen pro tkm TtW	$G_t(T)$	0,503	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm TtW	$G_t(T)$	503,07	g CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	0,614	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	613,98	g CO _{2e} /tkm

5.1.3 Straße

Die für die Berechnung eines dieselbetriebenen Lkw benötigten Werte finden sich in Tabelle 19.

Tabelle 19: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren für ein mit Diesel betriebenen Lkw auf dem Landweg von Shanghai nach Hamburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Transportlänge	$l_{\text{Transport}}$	10.605	Km
Transportkapazität	$k_{\text{Transport}}$	20	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	f(VOS)	0,40 ¹²	l/km
Energiefaktor TtW (Diesel)	e_t	35,90	MJ/l
Energiefaktor WtW (Diesel)	e_w	42,70	MJ/l
THG-Emissionsfaktor TtW (Diesel)	g_t	2,67	Kg CO _{2e} /l
THG-Emissionsfaktor WtW (Diesel)	g_w	3,24	Kg CO _{2e} /l

¹² Nach Schmidt (2021); Webfleet (2020)

Die Berechnungen des Gesamtkraftstoffverbrauchs, der Transportleistung, der Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen wurden nach dem aufgezeigten Rechenweg in Abschnitt 2 durchgeführt und können im Anhang detailliert nachvollzogen werden. In Tabelle 20 werden die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 20: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen für einen dieselbetriebenen Lkw auf dem Landweg von Shanghai nach Hamburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Gesamtkraftstoffverbrauch	F(VOS)	4.242	l Diesel
Transportleistung	T	212.100	tkm
Energieverbrauch TtW	E_t	152.287,8	MJ
Energieverbrauch WtW	E_w	181.133,4	MJ
THG-Emissionen TtW	G_t	11.326,1	Kg CO _{2e}
THG-Emissionen WtW	G_w	13.744,1	Kg CO _{2e}
Energieverbrauch pro tkm TtW	$E_t(T)$	0,359	MJ/tkm
Energieverbrauch pro tkm WtW	$E_w(T)$	0,427	MJ/tkm
THG-Emissionen pro tkm TtW	$G_t(T)$	0,053	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm TtW	$G_t(T)$	53,40	g CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	0,065	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	64,80	g CO _{2e} /tkm

5.1.4 Schiene

Anders als bei den anderen betrachteten Treibstoffen, werden der spezifische Kraftstoffverbrauch sowie die Energie- und Treibhausgasemissionsfaktoren bei elektrisch betriebenem Schienengüterverkehr nicht pro Liter, sondern pro Kilowattstunde angegeben. Darüber hinaus ist für den Energiefaktor Well-to-tank e_w die Kenntnis darüber wichtig, wie hoch die Energieeffizienz der Stromversorgung für den Schienenverkehr ist, das bedeutet, wie hoch der tatsächlich in Energie umgesetzte Anteil an elektrischer Energie ist, die der Bahn zur Verfügung gestellt wird. Die DIN EN 16258 gibt hierbei eine Energieeffizienz von 32 Prozent für Deutschland an, die sowohl für die Lang- als auch für die Kurzstrecke länderübergreifend übernommen wurde. Zusammen mit dem Tank-to-Wheel Energiefaktor e_t , der mit 3,6 MJ/kWh aus der DIN EN 16258 übernommen wurde, ergab der Well-to-Wheel Energiefaktor e_w einen Wert von 11,25 MJ/kWh. Die Rechnung ist in den Gleichungen [14], [15] und [16] dargestellt.

$$e_{w,Strom} = \frac{e_{t,Strom}}{\eta} \quad [14]$$

$$e_{w,Strom} = \frac{3,6 \frac{MJ}{kWh}}{32 \%} \quad [15]$$

$$e_{w,Strom} = 11,25 \text{ MJ/kWh} \quad [16]$$

Wie bereits in Abschnitt 2 erläutert, muss für jede Strecke ein eigener Treibhausgasemissionsfaktor ermittelt werden. Für die Berechnung des Emissionsfaktors für die Langstrecke von Shanghai nach Hamburg werden verschiedenste Daten benötigt. Zunächst muss die Zusammensetzung des Bahnstrommix jedes Staates auf der Langstrecke bekannt sein (siehe Tabelle 21).

Tabelle 21: Zusammensetzung des Bahnstrommix in fossile Energieträger, Atomenergie und erneuerbare Energieträger der Länder auf der Langstrecke von Shanghai nach Hamburg in Prozent.

Strecke	Land	Fossile Energieträger	Atomenergie	Erneuerbare Energieträger	Einheit
SHA-HAM	China	73	3	24	%
SHA-HAM	Kasachstan	88	0	12	%
SHA-HAM	Russland	66	18	16	%
SHA-HAM	Belarus	45	52	3	%
SHA-HAM	Polen	81	0	19	%
SHA-HAM	Deutschland	27	11	62	%

Um aus den bekannten Daten Treibhausgasemissionsfaktoren zu berechnen, müssen die CO_{2e}-Faktoren der vorkommenden Energieträger bekannt sein; diese finden sich in Tabelle 22.

Tabelle 22: CO_{2e}-Faktoren von Strom aus erneuerbaren Energieträgern, Atomenergie und Strom aus fossilen Energieträgern in Kg CO₂/kWh.

Energieträger	CO _{2e} -Faktor	Einheit
Strom aus erneuerbaren Energieträgern (Durchschnitt)	0,051 ¹³	Kg CO _{2e} /kWh
Strom aus Kernkraft	0,025 ¹⁴	Kg CO _{2e} /kWh

¹³ Durchschnitt aus den Emissionsfaktoren inklusive Vorkette von Photovoltaik, Wind- und Wasserkraft nach Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2007)

¹⁴ Nach Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2007); Umweltbundesamt (2019a)

Energieträger	CO _{2e} -Faktor	Einheit
Strom aus fossilen Energieträgern (Durchschnitt)	0,826 ¹⁵	Kg CO _{2e} /kWh

Daraus lassen sich die CO_{2e}-Faktoren für den Strommix der einzelnen Länder berechnen. Am Beispiel China wird die Vorgehensweise dargestellt (vgl. Gleichungen [17], [18], [19]). Alle weiteren Länderrechnungen können im Anhang nachvollzogen werden. Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in Tabelle 23 aufgelistet.

$$g_{w,CHN} = (x_{fossil} * g_{w,fossil}) + (x_{nuklear} * g_{w,nuklear}) + (x_{ee} * g_{w,ee}) \quad [17]$$

$$g_{w,CHN} = (0,73 * 0,826 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,03 * 0,025 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,24 * 0,051 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) \quad [18]$$

$$g_{w,CHN} = 0,62 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [19]$$

Tabelle 23: CO_{2e}-Faktoren des jeweiligen Bahnstrommix für China, Kasachstan, Russland, Belarus, Polen und Deutschland in Kg CO_{2e}/kWh.

Strecke	Land	CO _{2e} -Faktor	Einheit
SHA-HAM	China	0,62	Kg CO _{2e} /kWh
SHA-HAM	Kasachstan	0,73	Kg CO _{2e} /kWh
SHA-HAM	Russland	0,55	Kg CO _{2e} /kWh
SHA-HAM	Belarus	0,38	Kg CO _{2e} /kWh
SHA-HAM	Polen	0,68	Kg CO _{2e} /kWh
SHA-HAM	Deutschland	0,26	Kg CO _{2e} /kWh

Mit der Kenntnis über den Streckenanteil pro Land an der gesamten Transportstrecke (siehe Tabelle 23 und Tabelle 24) lässt sich abschließend der CO_{2e}-Faktor für die gesamte Strecke ermitteln.

Tabelle 24: Streckenverteilung der Langstrecke auf die einzelnen Länder mit Angabe der Gesamtlänge pro Strecke und der jeweiligen Teilstreckenlänge pro Land in Kilometern.

Strecke	Gesamtlänge	Land	Teilstreckenlänge	Einheit
SHA-HAM	10.721	China	4.239,2	km

¹⁵ Durchschnitt aus den Emissionsfaktoren inklusive Vorkette von Braunkohle, Steinkohle und Erdgas nach Quaschnig und Siegel (2022)

Strecke	Gesamtlänge	Land	Teilstreckenlänge	Einheit
SHA-HAM	10.721	Kasachstan	2.280,3	km
SHA-HAM	10.721	Russland	2.542,9	km
SHA-HAM	10.721	Belarus	609,7	km
SHA-HAM	10.721	Polen	667,5	km
SHA-HAM	10.721	Deutschland	381,4	km

Tabelle 25: Streckenverteilung der Langstrecke auf die einzelnen Länder mit Angabe des Streckenanteils pro Land in Prozent.

Strecke	Land	Streckenanteil	Einheit
SHA-HAM	China	40	%
SHA-HAM	Kasachstan	21	%
SHA-HAM	Russland	24	%
SHA-HAM	Belarus	6	%
SHA-HAM	Polen	6	%
SHA-HAM	Deutschland	4	%

Der Rechenweg für den Treibhausgasemissionsfaktor der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg ist in den Gleichungen [20], [21] und [22] abgebildet.

$$g_{w,SHA-HAM} = (x_{CHN} * g_{w,CHN}) + (x_{KAZ} * g_{w,KAZ}) + (x_{RUS} * g_{w,RUS}) + (x_{BLR} * g_{w,BLR}) + (x_{POL} * g_{w,POL}) + (x_{DEU} * g_{w,DEU}) \quad [20]$$

$$g_{w,SHA-HAM} = (0,4 * 0,62 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,21 * 0,73 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,24 * 0,55 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,06 * 0,38 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,06 * 0,68 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,04 * 0,26 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) \quad [21]$$

$$g_{w,SHA-HAM} = 0,60 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [22]$$

Das Ergebnis aus Gleichung [22] sowie alle weiteren für die Berechnung des strombetriebenen Güterzugs benötigten Werte finden sich in Tabelle 26.

Tabelle 26: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren für einen strombetriebenen Güterzug auf dem Schienenweg von Shanghai nach Hamburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Transportlänge	$l_{\text{Transport}}$	10.721	Km
Transportkapazität	$k_{\text{Transport}}$	1.040	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(\text{VOS})$	26,30 ¹⁶	kWh/km
Energiefaktor TtW (Strom)	e_t	3,60	MJ/kWh
Energiefaktor WtW (Strom)	e_w	11,25	MJ/kWh
THG-Emissionsfaktor TtW (Strom)	g_t	0,0	Kg CO _{2e} /kWh
THG-Emissionsfaktor WtW (Strom)	g_w	0,60	Kg CO _{2e} /kWh

Die Berechnungen des Gesamtkraftstoffverbrauchs, der Transportleistung, der Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen wurden nach dem aufgezeigten Rechenweg in Abschnitt 2 durchgeführt und können im Anhang detailliert nachvollzogen werden. In Tabelle 27 werden die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 27: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen für einen strombetriebenen Güterzug auf dem Schienenweg von Shanghai nach Hamburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Gesamtkraftstoffverbrauch	$F(\text{VOS})$	281.962,3	kWh
Transportleistung	T	11.149.840	tkm
Energieverbrauch TtW	E_t	1.015.064,3	MJ
Energieverbrauch WtW	E_w	3.172.075,9	MJ
THG-Emissionen TtW	G_t	0	Kg CO _{2e}
THG-Emissionen WtW	G_w	170.223,02	Kg CO _{2e}
Energieverbrauch pro tkm TtW	$E_t(T)$	0,045	MJ/tkm
Energieverbrauch pro tkm WtW	$E_w(T)$	0,141	MJ/tkm
THG-Emissionen pro tkm TtW	$G_t(T)$	0	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	0,015	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	15,27	g CO _{2e} /tkm

¹⁶ Nach DIN EN 16258, S. 44

5.1.5 Emissionsfaktor nach allgemeiner Transportverteilung auf der Langstrecke

Um den allgemeinen Emissionsfaktor für die Langstrecke zu ermitteln, werden die Daten, geltend für den Import aus Drittstaaten, aus Tabelle 28 entnommen.

Tabelle 28: Anteil an der Verkehrsleistung der einzelnen Beförderungsmittel für den Import von Gütern aus Drittstaaten nach Deutschland in Prozent.

Verkehrsträger	Exportland	Anteil Import nach Deutschland	Einheit
Schiffstransport	Drittstaaten	89,47	%
Flugzeugtransport	Drittstaaten	0,61	%
Lkw-Transport	Drittstaaten	8,62	%
Güterzugtransport	Drittstaaten	1,19	%

Die Emissionsfaktoren in Gramm CO_{2e} pro Tonnenkilometer der jeweiligen Beförderungsmittel werden für den Schiffstransport aus Tabelle 16, für den Flugzeugtransport aus Tabelle 18, für den Lkw-Transport aus Tabelle 20 und für den Güterzugtransport aus Tabelle 27 herangezogen. Der darauffolgende Rechenweg für den allgemeinen Treibhausgasemissionsfaktor der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg ist in den Gleichungen [23], [24] und [25] abgebildet.

$$G_{w,allg,Lang}(T) = (x_{Schiff} * G_{w,Schiff}(T)) + (x_{Flug} * G_{w,Flug}(T)) + (x_{Lkw} * G_{w,Lkw}(T)) + (x_{Schiene} * g_{w,Schiene}(T)) \quad [23]$$

$$G_{w,allg,Lang}(T) = (0,89 * 4,63 \frac{g CO_{2e}}{tkm}) + (0,006 * 613,98 \frac{g CO_{2e}}{tkm}) + (0,086 * 64,80 \frac{g CO_{2e}}{tkm}) + (0,019 * 15,27 \frac{g CO_{2e}}{tkm}) \quad [24]$$

$$G_{w,allg,Lang}(T) = 13,68 \frac{g CO_{2e}}{tkm} \quad [25]$$

5.2 Kurzstrecke: Rotterdam nach Duisburg

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der einzelnen Beförderungsmittel für die Strecke von Rotterdam nach Duisburg hinsichtlich Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen vorgestellt. Auch hier erfolgten die Berechnungen nach der in Kapitel 2 aufgezeigten Methodik.

5.2.1 Wasserstraße

Die für die Berechnung des dieselbetriebenen Binnenschiffs benötigten Werte finden sich in Tabelle 29.

Tabelle 29: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren für ein mit Diesel betriebenes Binnenschiff auf der Binnenwasserstrecke von Rotterdam nach Duisburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Transportlänge	$l_{\text{Transport}}$	218	Km
Transportkapazität	$k_{\text{Transport}}$	5.000	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(\text{VOS})$	24,90 ¹⁷	l/km
Energiefaktor TtW (Diesel)	e_t	35,90	MJ/l
Energiefaktor WtW (Diesel)	e_w	42,70	MJ/l
THG-Emissionsfaktor TtW (Diesel)	g_t	2,67	Kg CO _{2e} /l
THG-Emissionsfaktor WtW (Diesel)	g_w	3,24	Kg CO _{2e} /l

Die Berechnungen des Gesamtkraftstoffverbrauchs, der Transportleistung, der Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen wurden nach dem aufgezeigten Rechenweg in Abschnitt 2 durchgeführt und können im Anhang detailliert nachvollzogen werden. In Tabelle 30 werden die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 30: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen für ein dieselbetriebenes Binnenschiff auf der Binnenwasserstrecke von Rotterdam nach Duisburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Gesamtkraftstoffverbrauch	$F(\text{VOS})$	5.428,2	l Diesel
Transportleistung	T	654.000	tkm
Energieverbrauch TtW	E_t	194.872,4	MJ
Energieverbrauch WtW	E_w	231.784,1	MJ

¹⁷ Nach IFEU (2013, S. 33), mit Umrechnung nach BDBe (2023)

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
THG-Emissionen TtW	G_t	14.493,3	Kg CO _{2e}
THG-Emissionen WtW	G_w	17.587,4	Kg CO _{2e}
Energieverbrauch pro tkm TtW	$E_t(T)$	0,179	MJ/tkm
Energieverbrauch pro tkm WtW	$E_w(T)$	0,213	MJ/tkm
THG-Emissionen pro tkm TtW	$G_t(T)$	0,013	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm TtW	$G_t(T)$	13,30	g CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	0,016	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	16,14	g CO _{2e} /tkm

5.2.2 Luftstrecke

Wie bereits im Abschnitt 4.2.2 erläutert, kann die Strecke von Rotterdam nach Duisburg nicht ausschließlich mit dem Flugzeug zurückgelegt werden, daher wird die Route in die Teilstrecke Flugzeug und die Teilstrecke Lkw aufgeteilt. Infolgedessen werden sowohl die Transportleistung als auch die Werte von E_w , G_w , E_t und G_t ermittelt, indem die entsprechenden Werte für alle Teilstrecken addiert werden. Die entsprechenden Rechnungen werden in den Gleichungen [26] bis [5] dargestellt.

Transportleistung Gesamt

$$T_{Ges} = T_{Flug} + T_{Lkw} \quad [26]$$

Energieverbrauch Tank-to-Wheel Gesamt

$$E_t (VOS)_{Ges} = E_t (VOS)_{Flug} + E_t (VOS)_{Lkw} \quad [27]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel Gesamt

$$E_w (VOS)_{Ges} = E_w (VOS)_{Flug} + E_w (VOS)_{Lkw} \quad [28]$$

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel Gesamt

$$G_t (VOS)_{Ges} = G_t (VOS)_{Flug} + G_t (VOS)_{Lkw} \quad [29]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel Gesamt

$$G_w (VOS)_{Ges} = G_w (VOS)_{Flug} + G_w (VOS)_{Lkw} \quad [30]$$

Mit den für die gesamte Strecke ermittelten Werte werden anschließend die spezifischen Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen pro Tonnenkilometer mit der gesamten Transportleistung berechnet (vgl. Gleichung [31] bis [34]).

Energieverbrauch Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$E_t(T) = \frac{E_t (VOS)_{Ges}}{T_{Ges}} \quad [31]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$E_w(T) = \frac{E_w (VOS)_{Ges}}{T_{Ges}} \quad [32]$$

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_t(T) = \frac{G_t (VOS)_{Ges}}{T_{Ges}} \quad [33]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_w(T) = \frac{G_w (VOS)_{Ges}}{T_{Ges}} \quad [34]$$

Die für die Berechnung des kerosinbetriebenen Frachtflugzeugs sowie des dieselbetriebenen Lkws benötigten Werte finden sich in Tabelle 31.

Tabelle 31: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren eines mit Kerosin betriebenen Frachtflugzeugs im Hauptlauf und eines dieselbetriebenen Lkws im Vor- und Nachlauf auf dem Weg von Rotterdam nach Duisburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Teilstrecke Flugzeug (Hauptlauf)			
Transportlänge	$l_{\text{Transport}}$	178	Km
Transportkapazität	$k_{\text{Transport}}$	103	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(\text{VOS})$	20,40	l/km
Energiefaktor TtW (Kerosin)	e_t	35,30	MJ/l
Energiefaktor WtW (Kerosin)	e_w	42,00	MJ/l
THG-Emissionsfaktor TtW (Kerosin)	g_t	2,54	Kg CO _{2e} /l
THG-Emissionsfaktor WtW (Kerosin)	g_w	3,10	Kg CO _{2e} /l
Teilstrecke Lkw (Vor- und Nachlauf)			

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Transportlänge	$l_{\text{Transport}}$	392 ¹⁸	Km
Transportkapazität	$k_{\text{Transport}}$	27	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(\text{VOS})$	0,40	l/km
Energiefaktor TtW (Diesel)	e_t	35,90	MJ/l
Energiefaktor WtW (Diesel)	e_w	42,70	MJ/l
THG-Emissionsfaktor TtW (Diesel)	g_t	2,67	Kg CO _{2e} /l
THG-Emissionsfaktor WtW (Diesel)	g_w	3,24	Kg CO _{2e} /l

Die Berechnungen des Gesamtkraftstoffverbrauchs, der Transportleistung, der Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen wurden nach dem aufgezeigten Rechenweg in Abschnitt 2 mit den in diesem Kapitel (Gleichungen [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34]) aufgeführten Änderungen durchgeführt und können im Anhang detailliert nachvollzogen werden. In Tabelle 32 werden die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 32: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen eines mit Kerosin betriebenen Frachtflugzeugs im Hauptlauf und eines dieselpetriebenen Lkws im Vor- und Nachlauf auf dem Weg von Rotterdam nach Duisburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Teilstrecke Flugzeug (Hauptlauf)			
Gesamtkraftstoffverbrauch	$F(\text{VOS})$	3.631,2	l HFO
Transportleistung	T	18.334	tkm
Energieverbrauch TtW	E_t	128.181,4	MJ
Energieverbrauch WtW	E_w	152.510,4	MJ
THG-Emissionen TtW	G_t	9.223,25	Kg CO _{2e}
THG-Emissionen WtW	G_w	11.256,72	Kg CO _{2e}
Teilstrecke Lkw (Vor- und Nachlauf)			
Gesamtkraftstoffverbrauch	$F(\text{VOS})$	156,8	l HFO
Transportleistung	T	10.584	tkm
Energieverbrauch TtW	E_t	5.629,1	MJ
Energieverbrauch WtW	E_w	6.695,4	MJ
THG-Emissionen TtW	G_t	418,66	Kg CO _{2e}

¹⁸ Die tatsächliche Strecke von 98 km muss mit dem Faktor 4 multipliziert werden, da es vier 40-t Lkw mit einem maximalen Zuladegewicht von 27 Tonnen benötigt, um die Ladung des Frachtflugzeugs transportieren zu können

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
THG-Emissionen WtW	G_w	508,03	Kg CO _{2e}
Gesamt			
Transportleistung	T	28.918	tkm
Energieverbrauch TtW	E_t	133.810,5	MJ
Energieverbrauch WtW	E_w	159.205,8	MJ
THG-Emissionen TtW	G_t	9.641,9	Kg CO _{2e}
THG-Emissionen WtW	G_w	11.764,8	Kg CO _{2e}
Energieverbrauch pro tkm TtW	$E_t(T)$	4,627	MJ/tkm
Energieverbrauch pro tkm WtW	$E_w(T)$	5,505	MJ/tkm
THG-Emissionen pro tkm TtW	$G_t(T)$	0,333	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm TtW	$G_t(T)$	333,42	g CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	0,407	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	406,83	g CO _{2e} /tkm

5.2.3 Straße

Die für die Berechnung des dieselbetriebenen Lkw benötigten Werte finden sich in Tabelle 33.

Tabelle 33: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren für ein mit Diesel betriebenen Lkw auf dem Landweg von Rotterdam nach Duisburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Transportlänge	$l_{\text{Transport}}$	220	Km
Transportkapazität	$k_{\text{Transport}}$	20	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(\text{VOS})$	0,40	l/km
Energiefaktor TtW (Diesel)	e_t	35,90	MJ/l
Energiefaktor WtW (Diesel)	e_w	42,70	MJ/l
THG-Emissionsfaktor TtW (Diesel)	g_t	2,67	Kg CO _{2e} /l
THG-Emissionsfaktor WtW (Diesel)	g_w	3,24	Kg CO _{2e} /l

Die Berechnungen des Gesamtkraftstoffverbrauchs, der Transportleistung, der Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen wurden nach dem aufgezeigten Rechenweg in Abschnitt 2 durchgeführt und können im Anhang detailliert nachvollzogen werden. In Tabelle 34 werden die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 34: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen für einen dieselbetriebenen Lkw auf dem Landweg von Rotterdam nach Duisburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Gesamtkraftstoffverbrauch	F(VOS)	88	l Diesel
Transportleistung	T	4.400	tkm
Energieverbrauch TtW	E_t	3.159,2	MJ
Energieverbrauch WtW	E_w	3.757,6	MJ
THG-Emissionen TtW	G_t	234,96	Kg CO _{2e}
THG-Emissionen WtW	G_w	285,12	Kg CO _{2e}
Energieverbrauch pro tkm TtW	$E_t(T)$	0,718	MJ/tkm
Energieverbrauch pro tkm WtW	$E_w(T)$	0,854	MJ/tkm
THG-Emissionen pro tkm TtW	$G_t(T)$	0,053	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm TtW	$G_t(T)$	53,40	g CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	0,065	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	64,80	g CO _{2e} /tkm

5.2.4 Schiene

Für die Berechnung des Emissionsfaktors für die Kurzstrecke von Rotterdam nach Duisburg via Schienenverkehr werden mehr Daten als bei den anderen Verkehrsträgern benötigt. Zunächst muss die Zusammensetzung des Bahnstrommix jedes Staates auf der Kurzstrecke (siehe Tabelle 35) bekannt sein.

Tabelle 35: Zusammensetzung des Bahnstrommix in fossile Energieträger, Atomenergie und erneuerbare Energieträger der Länder auf der Kurzstrecke von Rotterdam nach Duisburg in Prozent.

Strecke	Land	Fossile Energieträger	Atomenergie	Erneuerbare Energieträger	Einheit
ROT-DUI	Deutschland	27	11	62	%
ROT-DUI	Niederlande	0	0	100	%

Um aus den bekannten Daten Treibhausgasemissionsfaktoren zu berechnen, müssen zusätzlich die CO_{2e}-Faktoren der vorkommenden Energieträger bekannt sein; diese finden sich in Tabelle 22, Abschnitt 5.1.4. Daraus lassen sich die CO_{2e}-Faktoren für den Strommix der einzelnen Länder berechnen. Am Beispiel Deutschland wird die Vorgehensweise dargestellt (vgl. Gleichungen [35], [36],

[37]). Alle weiteren Länderrechnungen können im Anhang nachvollzogen werden. Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in Tabelle 36 aufgelistet.

$$g_{w,DEU} = (x_{fossil} * g_{w,fossil}) + (x_{nuklear} * g_{w,nuklear}) + (x_{ee} * g_{w,ee}) \quad [35]$$

$$g_{w,DEU} = (0,27 * 0,732 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,11 * 0,012 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,62 * 0,033 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) \quad [36]$$

$$g_{w,DEU} = 0,22 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [37]$$

Tabelle 36: CO₂-Faktoren des jeweiligen Bahnstrommix für die Niederlande und Deutschland in Kg CO₂/kWh.

Strecke	Land	CO _{2e} -Faktor	Einheit
ROT-DUI	Deutschland	0,26	Kg CO _{2e} /kWh
ROT-DUI	Niederlande	0,05	Kg CO _{2e} /kWh

Mit der Kenntnis über den Streckenanteil pro Land an der gesamten Transportstrecke (siehe Tabelle 37 und Tabelle 38) lässt sich abschließend der CO_{2e}-Faktor für die gesamte Strecke ermitteln.

Tabelle 37: Streckenverteilung der Langstrecke auf die einzelnen Länder mit Angabe der Gesamtlänge pro Strecke und der jeweiligen Teilstreckenlänge pro Land in Kilometern.

Strecke	Gesamtlänge	Land	Teilstreckenlänge	Einheit
ROT-DUI	206	Deutschland	83	km
ROT-DUI	206	Niederlande	123	km

Tabelle 38: Streckenverteilung der Kurz- und Langstrecke auf die einzelnen Länder mit Angabe des Streckenanteils pro Land in Prozent.

Strecke	Land	Streckenanteil	Einheit
ROT-DUI	Deutschland	40	%
ROT-DUI	Niederlande	60	%

Der Rechenweg für den Treibhausgasemissionsfaktor der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg ist in den Gleichungen [38], [39] und [40] abgebildet.

$$g_{w,ROT-DUI} = (x_{NLD} * g_{w,NLD}) + (x_{DEU} * g_{w,DEU}) \quad [38]$$

$$g_{w,ROT-DUI} = (0,6 * 0,05 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,4 * 0,26 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) \quad [39]$$

$$g_{w,ROT-DUI} = 0,13 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [40]$$

Das Ergebnis aus Gleichung [40] sowie alle weiteren für die Berechnung des strombetriebenen Güterzugs benötigten Werte finden sich in Tabelle 39.

Tabelle 39: gesammelte Darstellung der Transportlänge, Transportkapazität, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, Energiefaktoren und Treibhausgasemissionsfaktoren für einen strombetriebenen Güterzug auf dem Schienenweg von Rotterdam nach Duisburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Transportlänge	$l_{Transport}$	206	Km
Transportkapazität	$k_{Transport}$	1.040	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(VOS)$	26,30	kWh/km
Energiefaktor TtW (Strom)	e_t	3,60	MJ/kWh
Energiefaktor WtW (Strom)	e_w	11,25	MJ/kWh
THG-Emissionsfaktor TtW (Strom)	g_t	0,0	Kg CO _{2e} /kWh
THG-Emissionsfaktor WtW (Strom)	g_w	0,13	Kg CO _{2e} /kWh

Die Berechnungen des Gesamtkraftstoffverbrauchs, der Transportleistung, der Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen wurden nach dem aufgezeigten Rechenweg in Abschnitt 2 durchgeführt und können im Anhang detailliert nachvollzogen werden. In Tabelle 40 werden die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 40: Ergebnisse der Berechnungen von Gesamtkraftstoffverbrauch, Transportleistung, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen für einen strombetriebenen Güterzug auf dem Schienenweg von Rotterdam nach Duisburg.

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Gesamtkraftstoffverbrauch	$F(VOS)$	5.417,8	kWh
Transportleistung	T	214.240	tkm
Energieverbrauch TtW	E_t	19.504,1	MJ
Energieverbrauch WtW	E_w	60.950,3	MJ
THG-Emissionen TtW	G_t	0	Kg CO _{2e}
THG-Emissionen WtW	G_w	704,31	Kg CO _{2e}
Energieverbrauch pro tkm TtW	$E_t(T)$	0,091	MJ/tkm
Energieverbrauch pro tkm WtW	$E_w(T)$	0,284	MJ/tkm

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
THG-Emissionen pro tkm TtW	$G_t(T)$	0	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	0,003	Kg CO _{2e} /tkm
THG-Emissionen pro tkm WtW	$G_w(T)$	3,29	g CO _{2e} /tkm

5.2.5 Emissionsfaktor nach allgemeiner Transportverteilung auf der Kurzstrecke

Um den allgemeinen Emissionsfaktor für die Kurzstrecke zu ermitteln, werden die Daten, geltend für den Import aus EU-Mitgliedstaaten, aus Tabelle 41 entnommen.

Tabelle 41: Anteil an der Verkehrsleistung der einzelnen Beförderungsmittel für den Import von Gütern aus EU-Mitgliedstaaten nach Deutschland in Prozent.

Verkehrsträger	Exportland	Anteil Import Deutschland	Einheit
Schiffstransport	EU-Mitgliedstaat	27,35	%
Flugzeugtransport	EU-Mitgliedstaat	0,03	%
Lkw-Transport	EU-Mitgliedstaat	65,40	%
Güterzugtransport	EU-Mitgliedstaat	7,22	%

Die Emissionsfaktoren in Gramm CO_{2e} pro Tonnenkilometer der jeweiligen Beförderungsmittel werden für den Schiffstransport aus Tabelle 30, für den Flugzeugtransport aus Tabelle 32, für den Lkw-Transport aus Tabelle 34 und für den Güterzugtransport aus Tabelle 40 herangezogen.

Der darauffolgende Rechenweg für den allgemeinen Treibhausgasemissionsfaktor der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg ist in den Gleichungen [41], [42] und [43] abgebildet.

$$G_{w,allg,Kurz}(T) = (x_{Schiff} * G_{w,Schiff}(T)) + (x_{Flug} * G_{w,Flug}(T)) + (x_{Lkw} * G_{w,Lkw}(T)) + (x_{Schiene} * g_{w,Schiene}(T)) \quad [41]$$

$$G_{w,allg,Kurz}(T) = (0,27 * 16,14 \frac{g CO_{2e}}{tkm}) + (0,003 * 406,83 \frac{g CO_{2e}}{tkm}) + (0,65 * 64,80 \frac{g CO_{2e}}{tkm}) + (0,072 * 3,29 \frac{g CO_{2e}}{tkm}) \quad [42]$$

$$G_{w,allg,Kurz}(T) = 47,15 \frac{g CO_{2e}}{tkm} \quad [43]$$

6 Auswertung der Ergebnisse

Für die folgende Auswertung der Ergebnisse wurden die ermittelten Werte der Beförderungsmittel aus den zugehörigen Abschnitten des Kapitels 5 entnommen.

6.1 Absolute Treibhausgasemissionen auf der Langstrecke

Auf dem Seeweg von Shanghai nach Hamburg emittiert ein mit 200.000 Tonnen beladenes Containerschiff 17.111.598 Kilogramm CO₂-Äquivalente.

Im Vergleich der direkten THG-Emissionen, die durch das Verbrennen des Energieträgers HFO freigesetzt werden, werden durch die Förderung und der Bereitstellung des fossilen Energieträgers rund 1.458.693 Kilogramm CO₂-Äquivalente zusätzlich emittiert. Die gesamten Well-to-Wheel Emissionen betragen demnach 18.570.291 Kilogramm CO₂-Äquivalente. Das entspricht einer Differenz von acht Prozent zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel Emissionen. Der Vergleich zwischen beiden Werten wird in Abbildung 15 dargestellt.

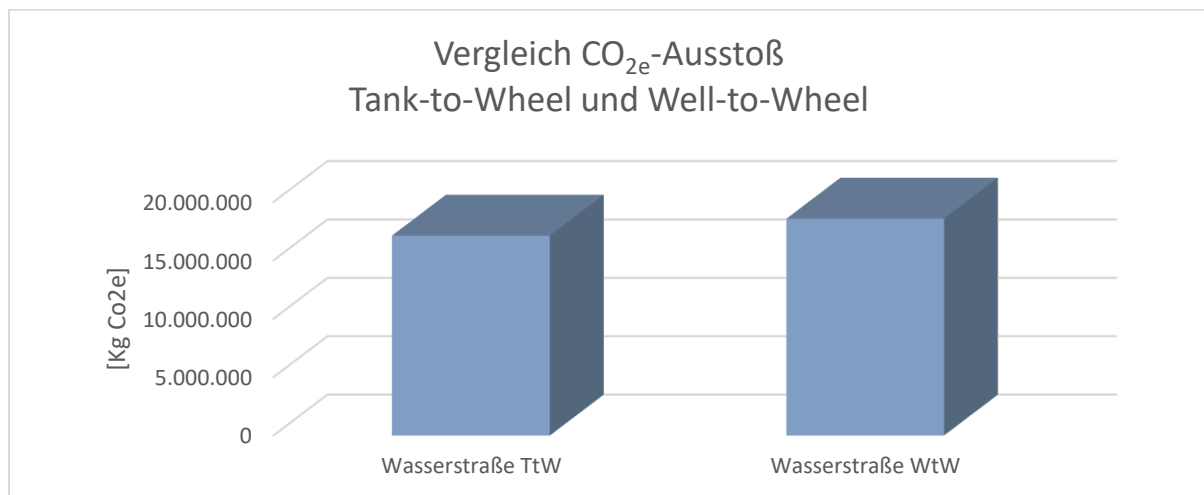


Abbildung 15: Vergleich des absoluten CO₂e-Ausstoßes zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf der Wasserstraße von Shanghai nach Hamburg in Kg CO₂e.

Mit dem Frachtflugzeug beträgt die Transportlänge rund 10.000 Kilometer von Shanghai nach Hamburg. Laut Emissionsberechnung werden dabei 480.334 Kilogramm CO₂-Äquivalente durch das Verbrennen von Kerosin freigesetzt. Der Unterschied zwischen direkten Treibhausgasemissionen und der gesamten Emissionshöhe (WtW) beträgt im Fall des Transports über den Luftweg circa 18 Prozent: Hier werden insgesamt 568.235 Kilogramm CO₂-Äquivalente ausgestoßen. Beide Werte können aus Abbildung 16 entnommen werden.

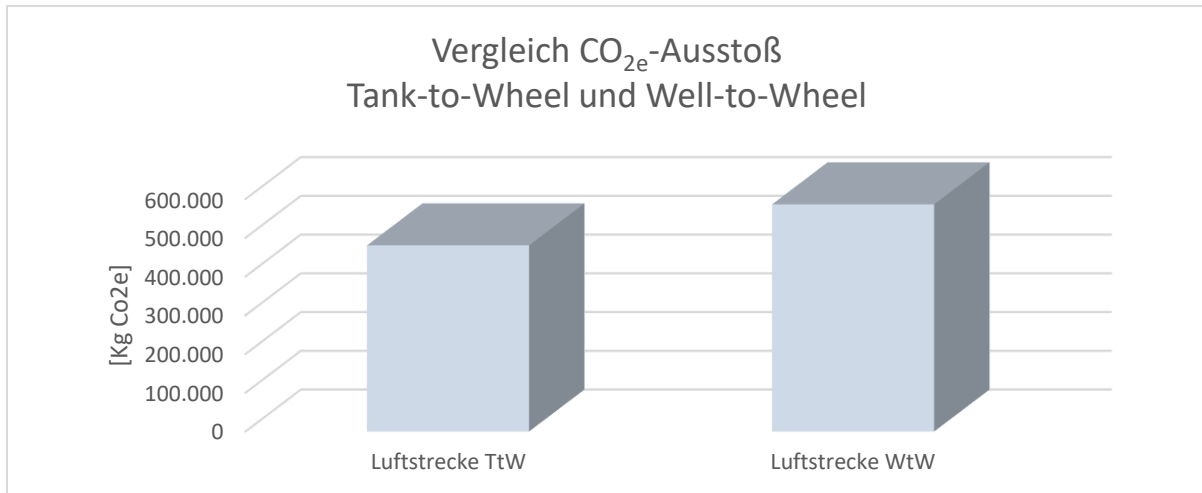


Abbildung 16: Vergleich des absoluten CO_{2e}-Ausstoßes zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf der Luftstrecke von Shanghai nach Hamburg in Kg CO_{2e}.

Über den Landweg emittiert ein mit 20 Tonnen Gut beladener Lkw auf dem Weg von Shanghai nach Hamburg 11.326 Kilogramm CO₂-Äquivalente (TtW). Der Unterschied zwischen direkten Treibhausgasemissionen und der gesamten Well-to-Wheel Emissionshöhe beträgt im Fall des Transports mit dem Lkw circa 21 Prozent: Hier werden insgesamt 13.744 Kilogramm CO₂-Äquivalente ausgestoßen. Die ausgewerteten Ergebnisse lassen sich der Abbildung 17 entnehmen.

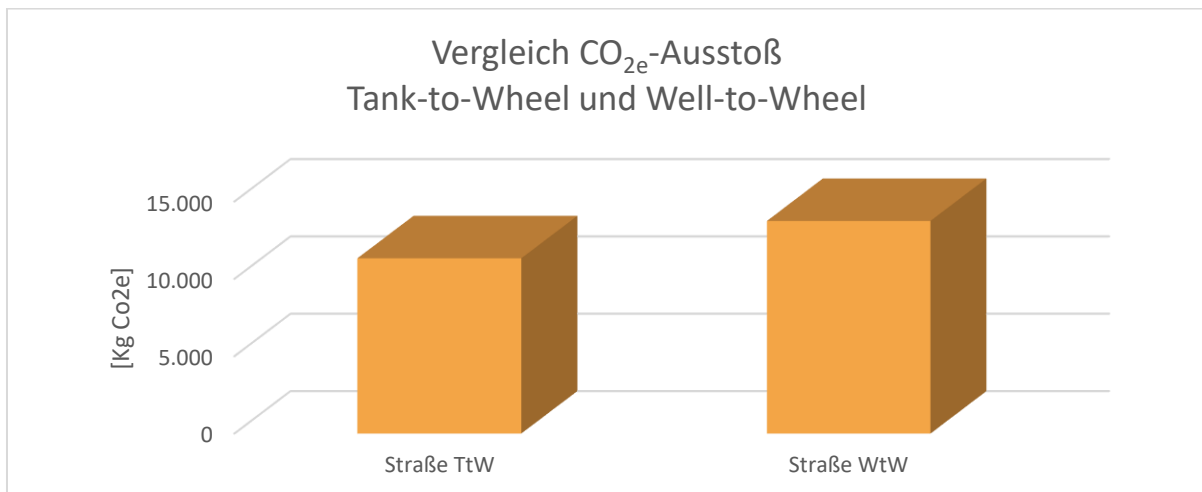


Abbildung 17: Vergleich des absoluten CO_{2e}-Ausstoßes zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf dem Landweg von Shanghai nach Hamburg in Kg CO_{2e}.

Im Gegensatz zu den bisher aufgeführten Beförderungsmitteln setzt ein elektrisch betriebener Güterzug auf dem Weg von Shanghai nach Hamburg keine direkten CO_{2e}-Emissionen frei. Daher können ausschließlich die Treibhausgasemissionen ermittelt werden, die durch die Umwandlung von Energieträgern zu Strom, den darauffolgenden Transport sowie der Bereitstellung von Strom für den

Schienenverkehr freigesetzt werden. Die Well-to-Wheel Emissionen betragen demnach rund 170.233,02 Kilogramm CO₂-Äquivalente. In Abbildung 18 werden die Ergebnisse dargestellt.

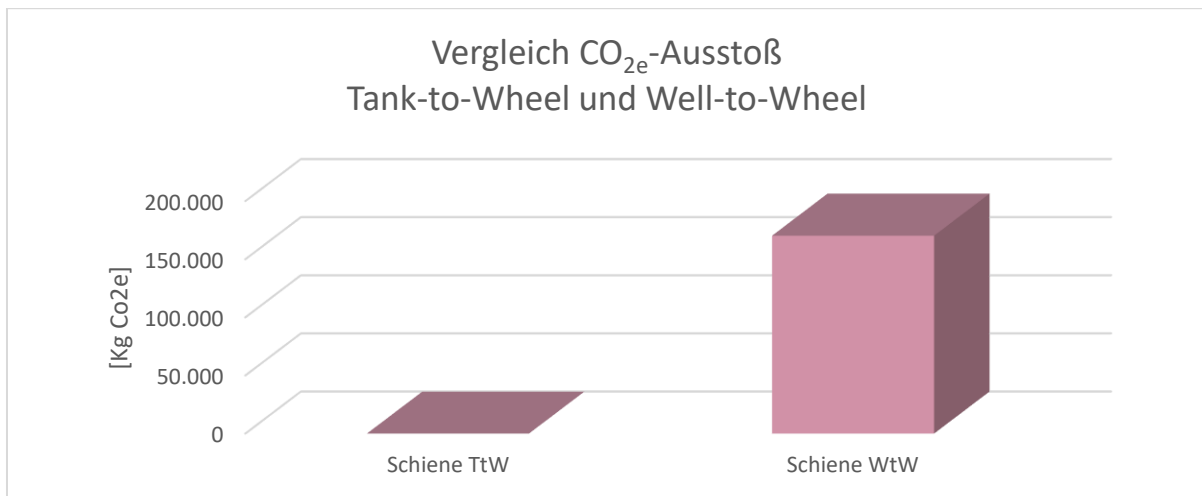


Abbildung 18: Vergleich des absoluten CO_{2e}-Ausstoßes zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf der Schienenstrecke von Shanghai nach Hamburg in Kg CO_{2e}.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die absoluten Treibhausgasemissionen sowohl direkt als auch unter Einbezug von vorgelagerten Emissionen auf der Wasserstraße mit deutlichem Abstand zu den anderen Beförderungsmitteln am höchsten ausfallen. Mit rund 587.000 Kilogramm CO₂-Äquivalenten folgt das Frachtflugzeug als zweithöchster Emittent. In einer ähnlichen Dimension befindet sich der Schienengüterverkehr mit knapp 171.223 Kilogramm CO_{2e}-Emissionen. Die geringste Freisetzung von Treibhausgasen erfolgt jedoch durch den Lkw-Transport. Den Schienenverkehr ausgenommen, liegt die Differenz von Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel Emissionen zwischen den einzelnen Transportmitteln bei acht bis 21 Prozent. Diese Differenzen liegen den THG-Emissionsfaktoren der jeweiligen Energieträger zugrunde, die aus der DIN EN 16258 entnommen wurden.

Eine Übersicht aller Ergebnisse finden sich in Abbildung 19 und Abbildung 20. Da im Vergleich zwischen den absoluten Treibhausgasemissionen der jeweiligen Transportmittel jedoch nicht berücksichtigt ist, dass jede Beförderungsmittel unterschiedliche Transportkapazitäten zur Verfügung stellt und mitunter unterschiedlich lange Transportwege zurücklegen muss, kann hieraus noch keine abschließende Bewertung der Beförderungsmittel erfolgen.

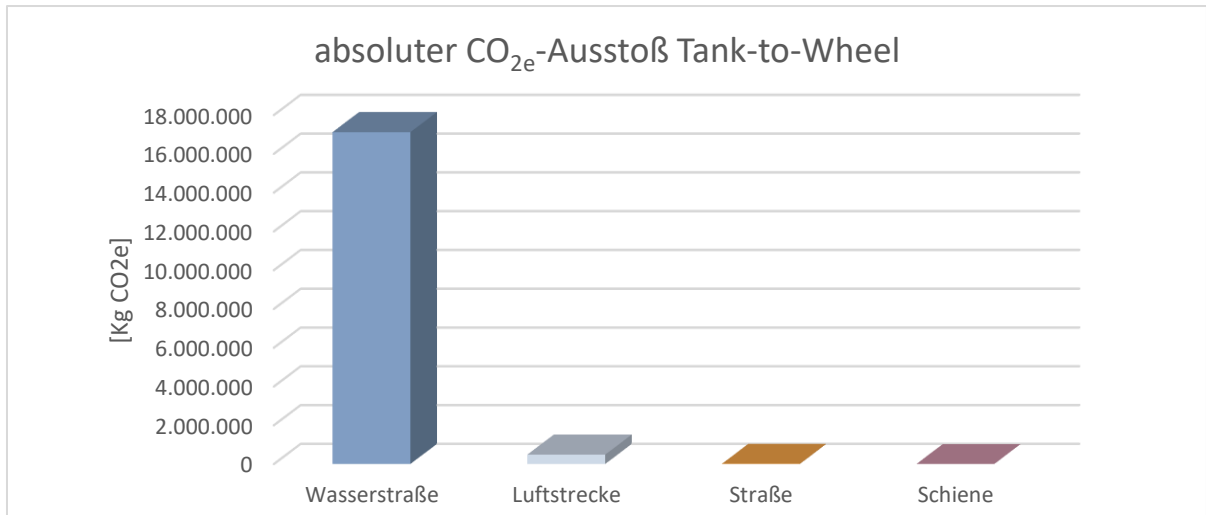


Abbildung 19: Vergleich des absoluten CO_{2e}-Ausstoß Tank-to-Wheel zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene in Kg CO_{2e} auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.

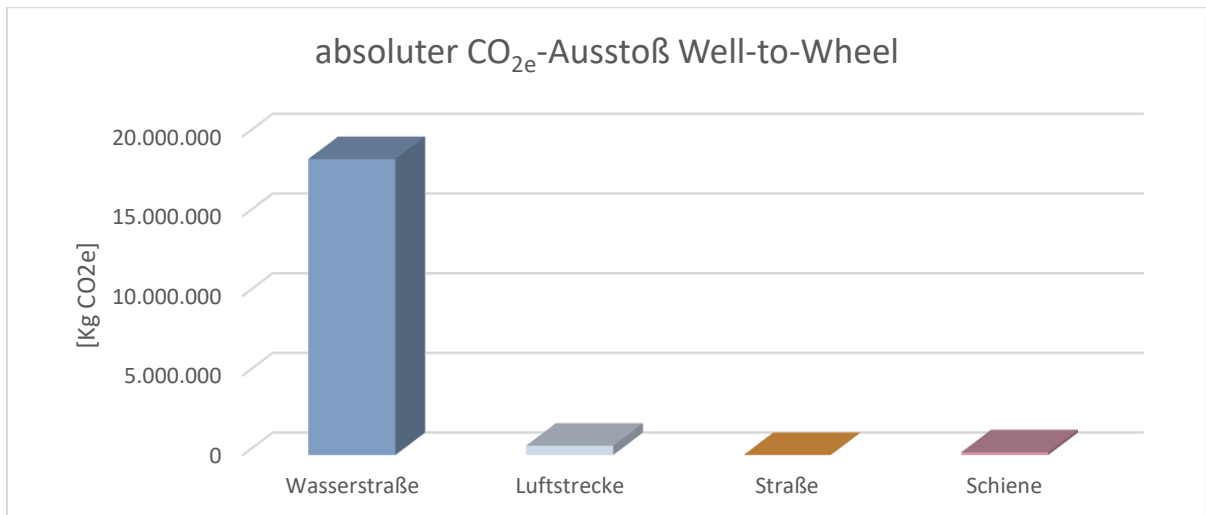


Abbildung 20: Vergleich des absoluten CO_{2e}-Ausstoß Well-to-Wheel zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene in Kg CO_{2e} auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.

6.2 Spezifische Treibhausgasemissionen auf der Langstrecke

Für die Auswertung des relativen CO_{2e}-Ausstoßes ist eine vorherige Betrachtung der Transportleistung aller Beförderungsmittel notwendig. Dabei setzt sich die Transportleistung aus der Transportlänge, die das Transportmittel zurücklegen muss, und der Transportkapazität, welches das Verkehrsmittel bereitstellt, zusammen. Aus Abbildung 21 wird ersichtlich, dass nicht nur die absoluten Treibhausgasemissionen auf dem Seeweg mit Abstand am höchsten sind, sondern auch die Beförderungsleistung. Mit rund vier Milliarden Tonnenkilometern (4.007.400.000 tkm) lässt das Containerschiff alle anderen betrachteten Beförderungsmittel weit hinter sich. Die Ursache hierfür liegt einerseits im doppelt so langen Transportweg von rund 20.000 Kilometern, den das Containerschiff zurücklegen muss; andererseits ist auch die Transportkapazität mit einer Ladungsmenge von 200.000 Tonnen um ein Vielfaches höher als im Frachtflugzeug (103 t), dem Lkw (20 t) oder auch im Güterzug (1.040 t).

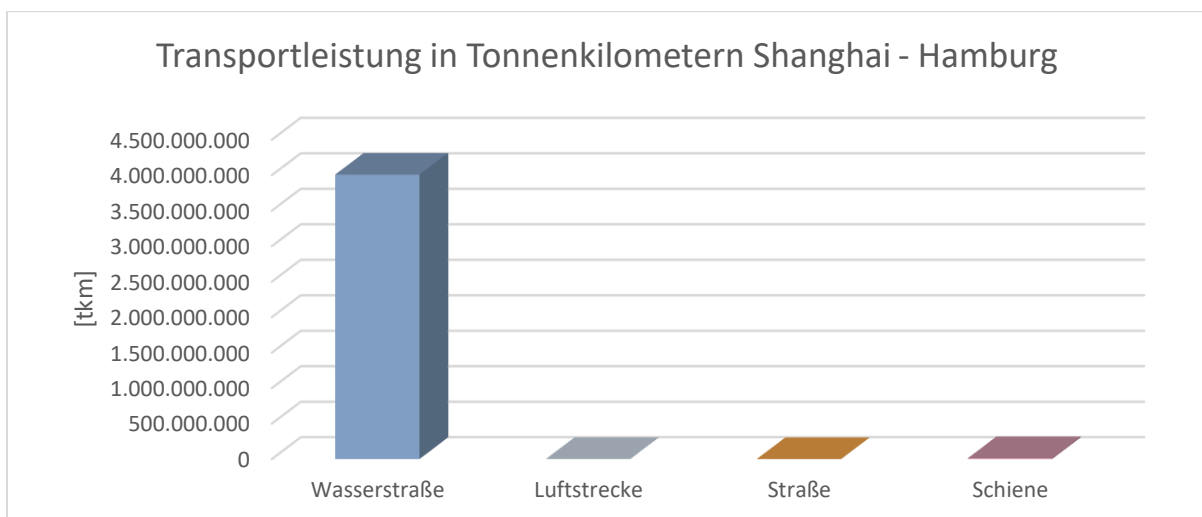


Abbildung 21: Vergleich der Transportleistung zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene in Tonnenkilometern auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.

Um einen besseren visuellen Vergleich zwischen Luftstrecke, Straßen- und Schienentransport herzustellen, sind die drei Beförderungsmittel in Abbildung 22 nochmals dargestellt. Es wird ersichtlich, dass der Schienengütertransport mit 11.149.840 Tonnenkilometern eine deutlich höhere Transportleistung vorweist als das Frachtflugzeug mit 954.810 Tonnenkilometern oder der Lkw mit 212.100 Tonnenkilometern. Grund dafür ist hier ausschließlich die höhere Transportkapazität des Güterzugs, da die Transportstrecke bei allen drei Beförderungsmitteln grob 10.000 Kilometer umfasst und somit nicht für den großen Unterschied in der Transportleistung verantwortlich sein kann.

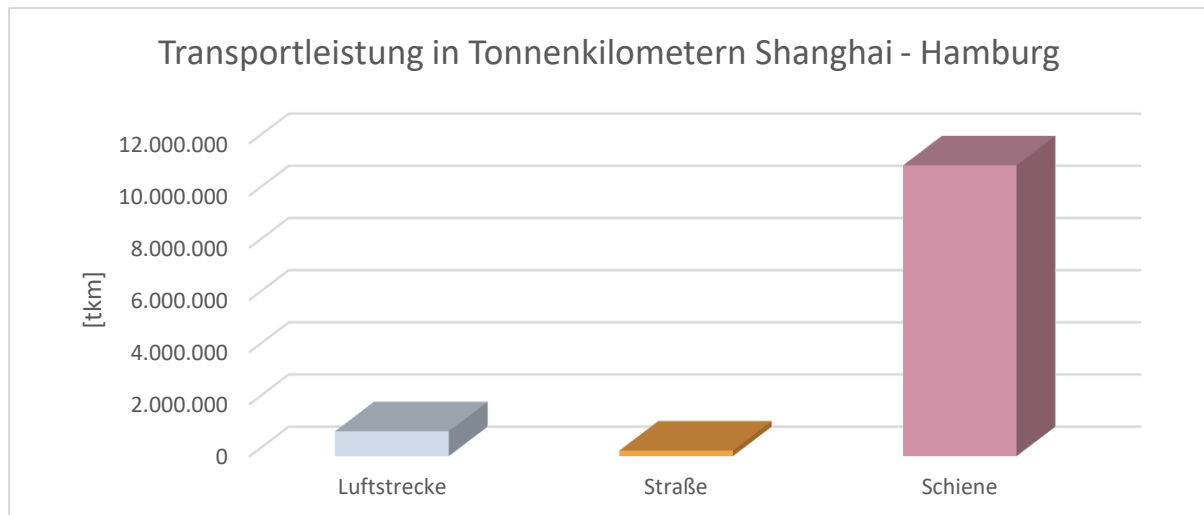


Abbildung 22: Vergleich der Transportleistung zwischen Luftstrecke, Straße und Schiene in Tonnenkilometern auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.

In den nachfolgenden Graphiken klar erkennbar ist der hohe Treibhausgasausstoß pro Tonnenkilometer auf der Luftstrecke: Mit deutlichem Abstand zu den restlichen Beförderungsmitteln hat das Frachtflugzeug mit insgesamt 614 Gramm CO_{2e} pro tkm den höchsten Treibhausgasausstoß pro beförderter Tonne und Kilometer. Der zweithöchste Emitter pro Tonnenkilometer ist nun das Lkw mit einer gesamten Emissionshöhe von 64,80 Gramm CO_{2e} pro tkm. Die niedrigsten relativen Emissionen werden durch den Güterzug und das Containerschiff erreicht: Mit 15,27 Gramm CO_{2e} pro tkm liegt der Güterzug noch deutlich vor dem Containerschiff mit Well-to-Wheel Emissionen von 4,63 Gramm CO_{2e} pro tkm. In den vorliegenden Ergebnissen macht sich nun erkennbar, wie viel Einfluss die rechnerische Vorgehensweise auf die Bewertung der Klimaschädlichkeit eines Transportmittels nehmen kann: Bei der Betrachtung des absoluten Treibhausgasausstoßes schnitt das Containerschiff am schlechtesten ab, da hier der Ausstoß mit großem Abstand am höchsten war; der Straßengütertransport wies dagegen die geringste Emissionshöhe auf. In der Bewertung unter Miteinbezug der Transportkapazität in der Transportleistung kann nun eine aussagekräftigere Bewertung hergestellt werden, da die jeweiligen Resultate nur dann miteinander vergleichbar sind, wenn die Emissionen aller Beförderungsmittel auf den gleichen Nenner Bezug nehmen. Aus den Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass das Frachtflugzeug auf der betrachteten Strecke mit Abstand das emissionsstärkste Beförderungsmittel ist.

Auch der Lkw-Transport setzt zwar deutlich weniger CO_{2e}-Emissionen pro Tonnenkilometer frei als das Frachtflugzeug, dennoch emittiert der Transport über die Straße immerhin noch rund das Vierfache an Treibhausgasemissionen pro beförderter Tonne und zurückgelegtem Kilometer als der Güterzug und sogar knapp 13 Mal mehr als das Containerschiff.

Den Schienenverkehr ausgenommen, liegt auch hier die Differenz von Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel Emissionen zwischen den einzelnen Transportmitteln bei acht bis 21 Prozent. Die graphische

Darstellung der relativen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel Emissionen aller Beförderungsmittel findet sich in Abbildung 23 und Abbildung 24.

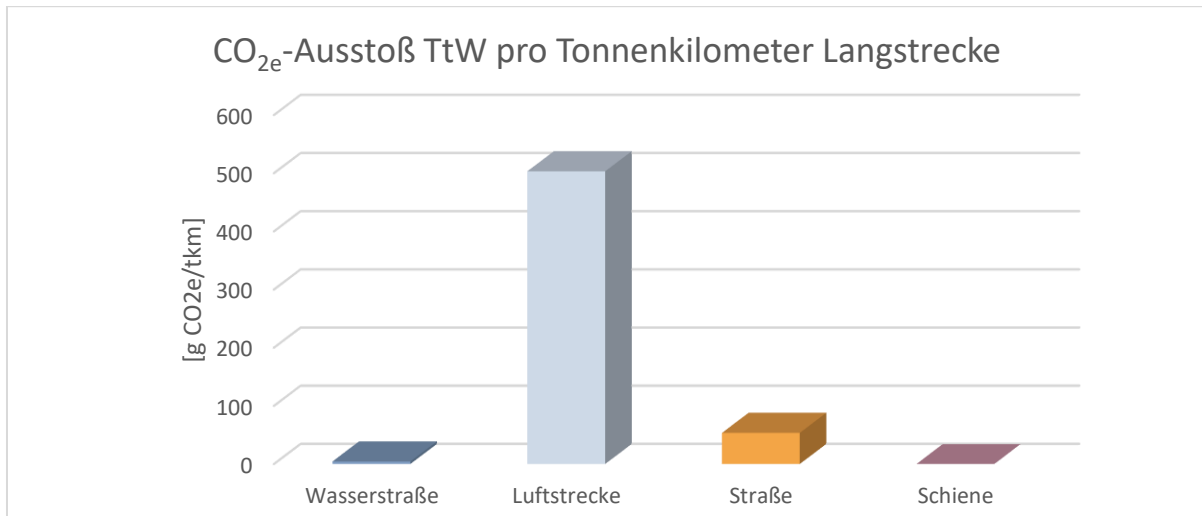


Abbildung 23: Vergleich des CO_{2e}-Ausstoß Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.

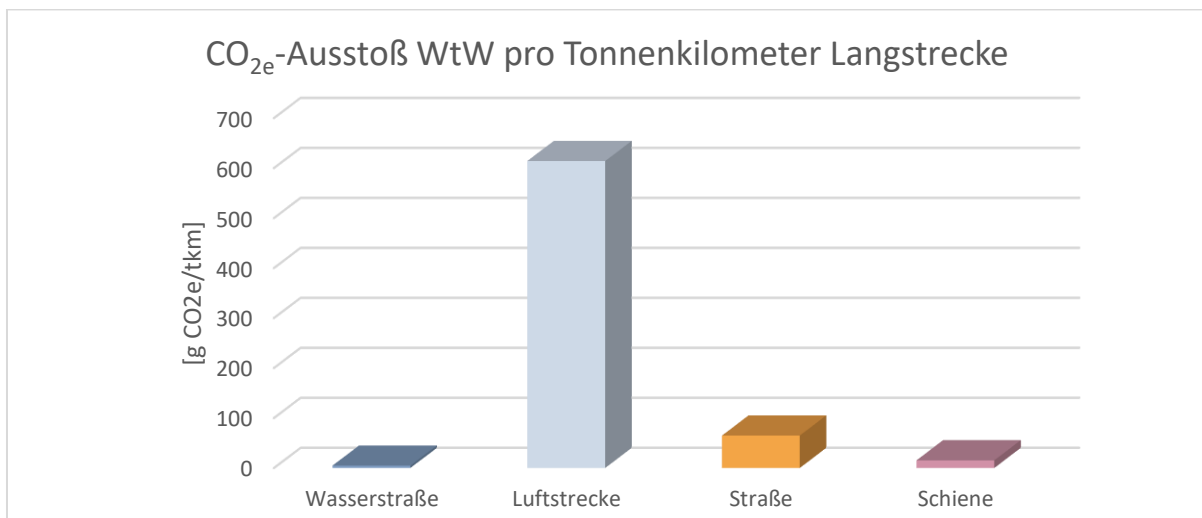


Abbildung 24: Vergleich des CO_{2e}-Ausstoß Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg.

6.3 Absolute Treibhausgasemissionen auf der Kurzstrecke

Auf der Binnenwasserstraße von Rotterdam nach Duisburg emittiert ein mit 5.000 Tonnen schweren Gütern beladenes Binnenschiff 14.493 Kilogramm CO₂-Äquivalente.

Im Vergleich der direkten THG-Emissionen, die durch das Verbrennen des Energieträgers Diesel freigesetzt werden, werden durch die Förderung und der Bereitstellung des fossilen Energieträgers rund 3.094 Kilogramm CO₂-Äquivalente zusätzlich emittiert. Die gesamten Emissionen (WtW) betragen demnach 17.587 Kilogramm CO₂-Äquivalente. Das entspricht einer Differenz von 21 Prozent zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel Emissionen. Der Vergleich zwischen beiden Werten wird in Abbildung 25 dargestellt.

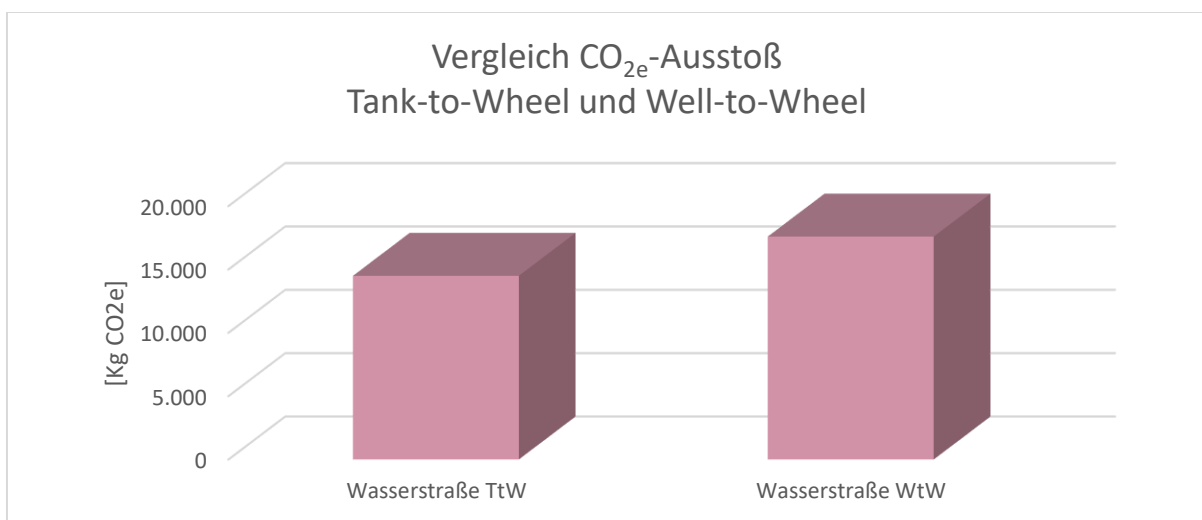


Abbildung 25: Vergleich des absoluten CO_{2e}-Ausstoßes zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf der Wasserstraße von Rotterdam nach Duisburg in Kg CO_{2e}.

Auf dem Luftweg beträgt die Transportlänge insgesamt rund 280 Kilometer von Rotterdam nach Duisburg. Laut Emissionsberechnung werden dabei 9.642 Kilogramm CO₂-Äquivalente durch das Verbrennen von Kerosin sowie Diesel im Vor- und Nachlauf freigesetzt. Der Unterschied zwischen direkten Treibhausgasemissionen und der Well-to-Wheel Emissionshöhe beträgt im Fall des Transports über den Luftweg circa 22 Prozent: Hier werden insgesamt 11.765 Kilogramm CO₂-Äquivalente ausgestoßen. Beide Werte können aus Abbildung 26 entnommen werden.

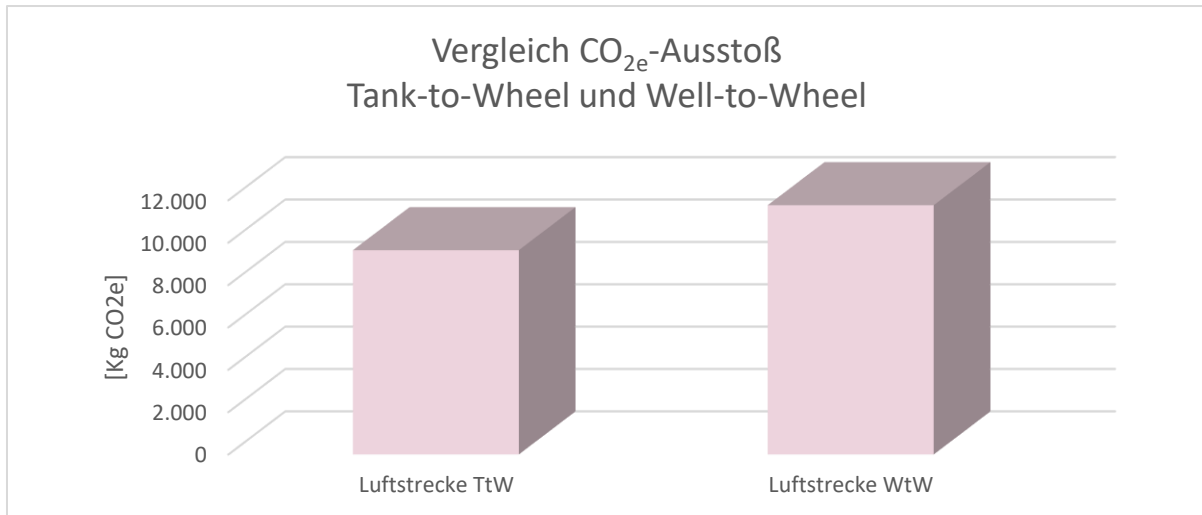


Abbildung 26: Vergleich des absoluten CO_{2e}-Ausstoß zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf der Luftstrecke von Rotterdam nach Duisburg in Kg CO_{2e}.

Der Straßengütertransport emittiert ein mit 20 Tonnen Gut beladener Lkw auf dem Weg von Rotterdam nach Duisburg rund 235 Kilogramm CO₂-Äquivalente bei Betrachtung von Tank-to-Wheel Emissionen. Der Unterschied zwischen direkten Treibhausgasemissionen und der gesamten Emissionshöhe (WtW) beträgt im Fall des Transports mit dem Lkw circa 21 Prozent: Hier werden insgesamt 285 Kilogramm CO₂-Äquivalente ausgestoßen. Die ausgewerteten Ergebnisse lassen sich aus der Abbildung 27 entnehmen.

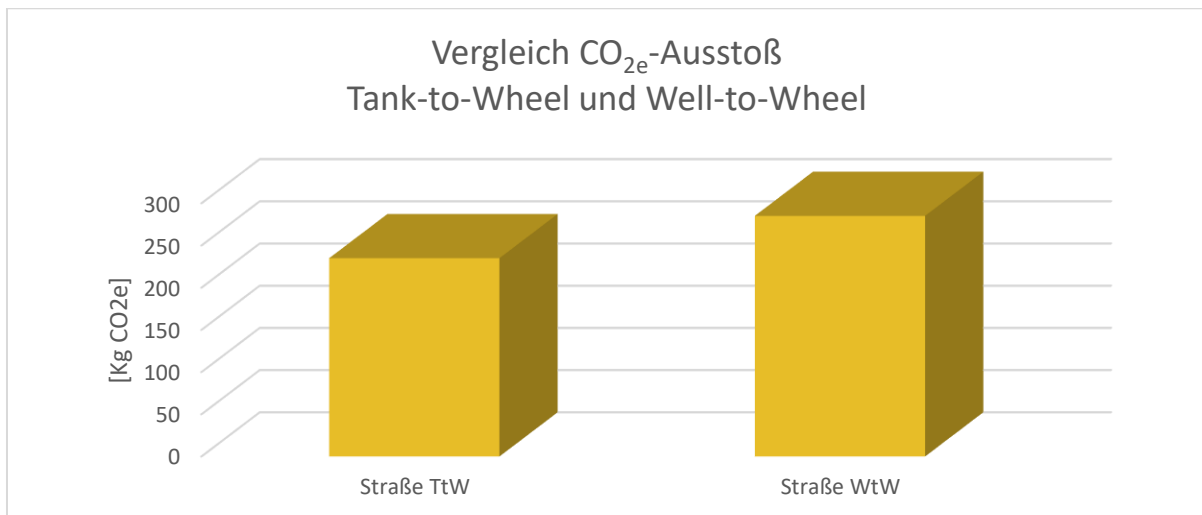


Abbildung 27: Vergleich des absoluten CO_{2e}-Ausstoß zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf dem Landweg von Rotterdam nach Duisburg in Kg CO_{2e}.

Wie bereits in Abschnitt 6.1 beschrieben, setzt ein elektrisch betriebener Güterzug keine direkten CO_{2e}-Emissionen frei. Daher können auch auf der Strecke von Rotterdam nach Duisburg ausschließlich die Treibhausgasemissionen ermittelt werden, die durch vorgelagerte Prozesse ausgestoßen werden. Die

Well-to-Wheel Emissionen betragen hierbei rund 704 Kilogramm CO₂-Äquivalente. In Abbildung 28 werden die Ergebnisse dargestellt.

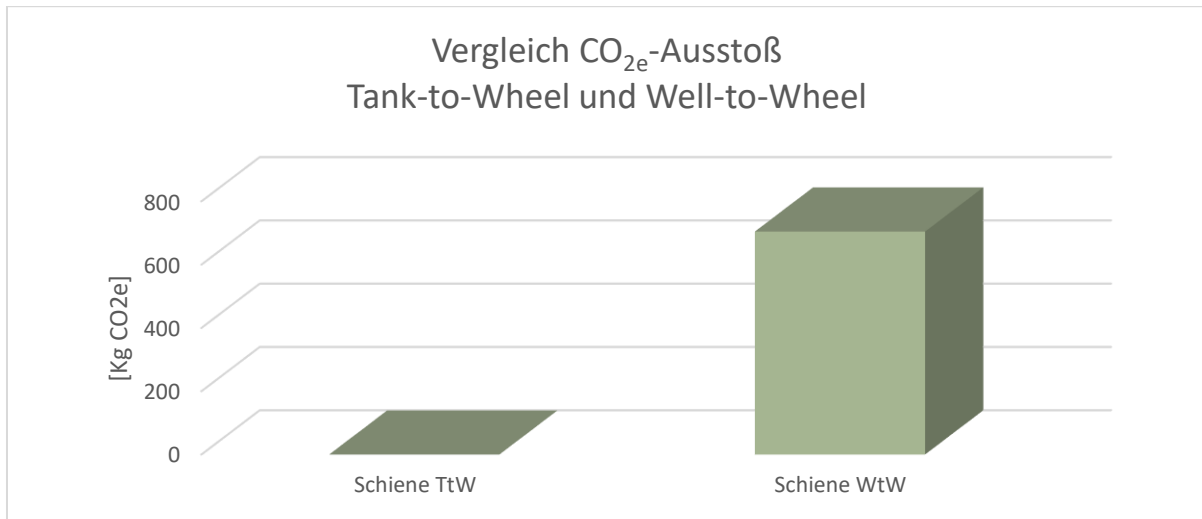


Abbildung 28: Vergleich des absoluten CO₂e-Ausstoßes zwischen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel auf der Schienenstrecke von Rotterdam nach Duisburg in Kg CO₂e.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die absoluten Treibhausgasemissionen sowohl direkt als auch unter Einbezug von vorgelagerten Emissionen auf der Wasserstraße und über den Luftweg am höchsten ausfallen. Im Gegensatz zur Langstrecke weisen hier die Emissionen von Luftstrecke und Wasserstraße einen geringeren Abstand zueinander auf. Der Grund hierfür liegt einerseits in der deutlich geringeren Transportkapazität und allgemeinen Größe von Binnenwasserschiffen im Vergleich zu Containerschiffen. Andererseits ist die Transportlänge auf der Binnenwasserstraße im Gegensatz zur Langstrecke vergleichbar mit den Streckenkilometern, welche die anderen Transportmittel jeweils zurücklegen müssen. Beide Sachverhalte bilden die Ursache für einen geringeren Gesamtreibstoffverbrauch des Binnenschiffs und resultieren damit in einem geringeren Abstand zur Emissionshöhe der übrigen Beförderungsmittel als das Containerschiff auf der Langstrecke. Weiterhin lässt sich ein größerer Abstand zwischen Luftstrecke und Schienengütertransport feststellen: Mit rund 11.765 Kilogramm CO₂-Äquivalenten stößt das Frachtflugzeug als zweithöchster Emittent circa 16 Mal mehr Treibhausgase aus als der Güterzug mit rund 704 Kilogramm CO₂-Äquivalenten. Der Grund hierfür liegt im sehr geringen Emissionsfaktor des Bahnstrommix der Niederlande und Deutschland, resultierend aus dem hohen Anteil von erneuerbaren Energien am Strommix (vgl. Tabelle 35 und Tabelle 36). In Abschnitt 6.5 wird dies noch weiter ausgeführt. Die geringste Freisetzung von Treibhausgasen erfolgt erneut durch den Lkw-Transport mit einem CO₂e-Ausstoß von insgesamt 285 Kilogramm.

Den Schienenverkehr ausgenommen, liegt die Differenz von Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel Emissionen zwischen den einzelnen Transportmitteln bei circa 22 Prozent. Diese Differenzen liegen

den THG-Emissionsfaktoren der jeweiligen Energieträger zugrunde, die aus der DIN EN 16258 entnommen wurden. Eine Übersicht aller Ergebnisse finden sich in Abbildung 29 und Abbildung 30. Im nächsten Abschnitt erfolgt die Betrachtung der relativen Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung der Transportleistung.

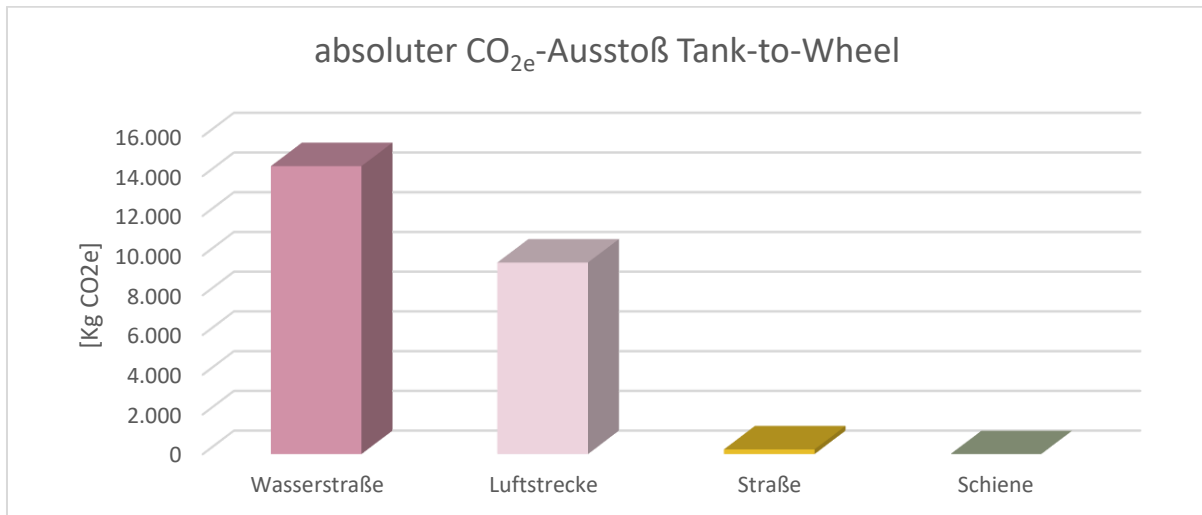


Abbildung 29: Vergleich des absoluten CO_{2e}-Ausstoß Tank-to-Wheel zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene in Kg CO_{2e} auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg.

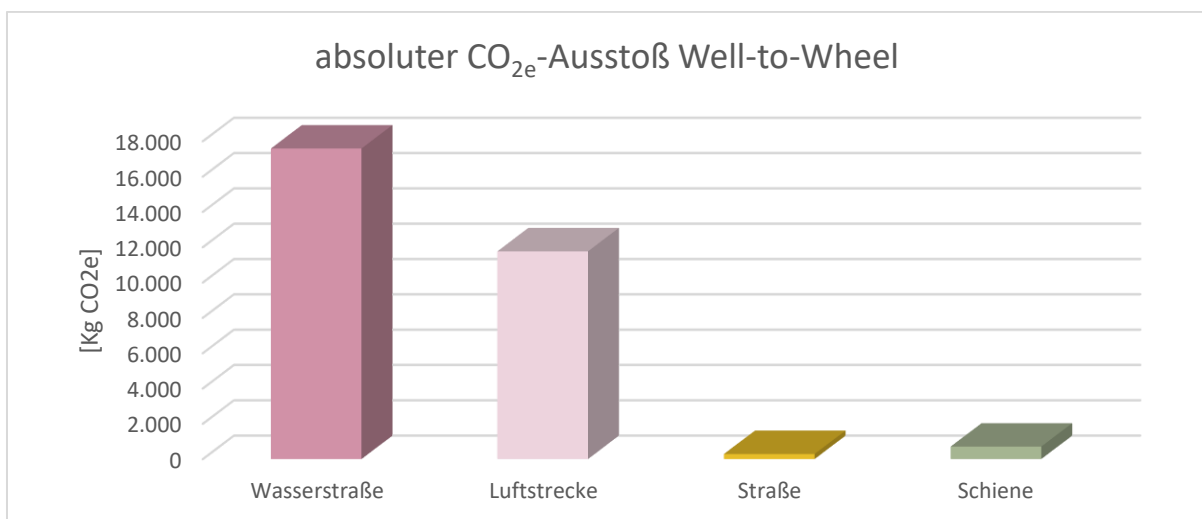


Abbildung 30: Vergleich des absoluten CO_{2e}-Ausstoß Well-to-Wheel zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene in Kg CO_{2e} auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg.

6.4 Spezifische Treibhausgasemissionen auf der Kurzstrecke

Wie bereits beschrieben, ist für die Auswertung des relativen CO_{2e}-Ausstoßes eine vorherige Betrachtung der Transportleistung aller Beförderungsmittel notwendig. Aus Abbildung 31 wird ersichtlich, dass nicht nur die absoluten Treibhausgasemissionen auf dem Binnenwasserweg am höchsten sind, sondern auch die Beförderungsleistung mit rund 1.090.000 Tonnenkilometern. Die Ursache für die Unterschiede in der Transportleistung aller Beförderungsmittel liegt im Fall der hier betrachteten Strecke im Gegensatz zur Langstrecke ausschließlich in den Unterschieden der Transportkapazität, da die Transportstrecke bei allen Beförderungsmitteln grob 220 Kilometer umfasst. Weiterhin ist ersichtlich, dass der Schienengütertransport mit 214.240 Tonnenkilometern eine deutlich höhere Transportleistung vorweist als das Frachtflugzeug mit 28.918 Tonnenkilometern oder der Lkw mit 4.400 Tonnenkilometern.

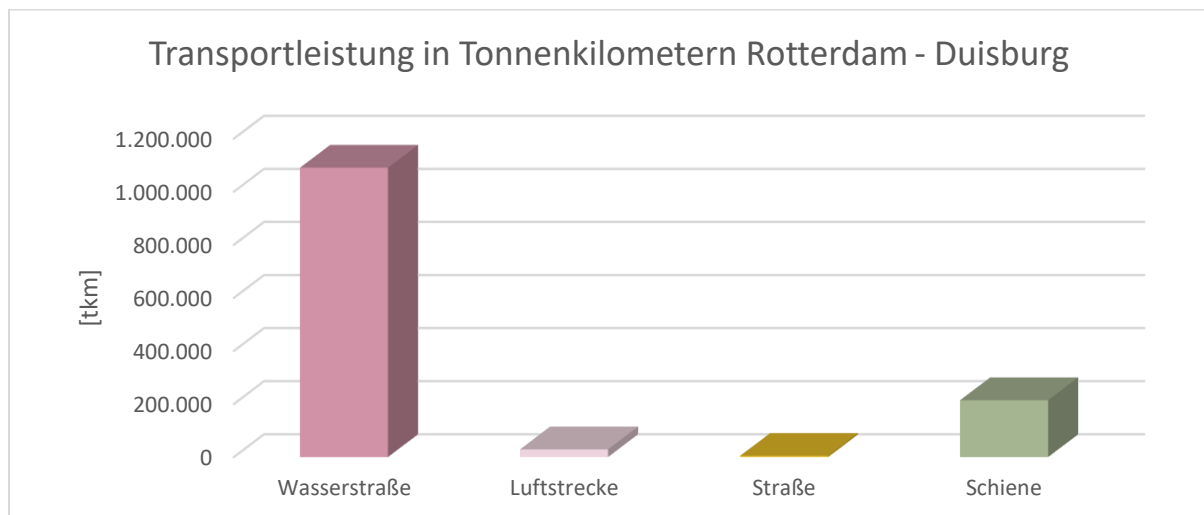


Abbildung 31: Vergleich der Transportleistung zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene in Tonnenkilometern auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg.

In den nachfolgenden Graphiken klar erkennbar ist der hohe Treibhausgasausstoß pro Tonnenkilometer auf der Luftstrecke: Mit deutlichem Abstand zu den restlichen Beförderungsmitteln hat das Frachtflugzeug mit insgesamt 406,8 Gramm CO_{2e} pro tkm den höchsten Treibhausgasausstoß pro beförderte Tonne und Kilometer. Der zweithöchste Emitter pro Tonnenkilometer ist nun der Lkw mit einer gesamten Emissionshöhe von 64,8 Gramm CO_{2e} pro tkm. Die niedrigsten relativen Emissionen werden durch den Güterzug und das Containerschiff erreicht. Mit lediglich 3,3 Gramm CO_{2e} pro tkm liegt der Güterzug noch deutlich unter dem Ausstoß des Binnenschiffs mit Well-to-Wheel Emissionen von 16,1 Gramm CO_{2e} pro tkm. Bei der Betrachtung des absoluten Treibhausgasausstoßes schnitt das Binnenschiff am schlechtesten ab, da hier der Ausstoß mit großem Abstand, vor allem zum Lkw- und Schienengütertransport, am höchsten war; der Straßengütertransport wies dagegen die geringste

Emissionshöhe auf. Aus den Ergebnissen der relativen Treibhausgasemissionen lässt sich nun jedoch schlussfolgern, dass das Frachtflugzeug auf der betrachteten Strecke mit Abstand das emissionsstärkste Beförderungsmittel ist. Hervorzuheben ist die geringe Emissionsintensität des Schienengüterverkehrs: Die Beförderungsmittel Binnenschiff und Lkw setzen zwar deutlich weniger CO_{2e}-Emissionen pro Tonnenkilometer frei als das Frachtflugzeug, dennoch emittiert der Transport über die Wasserstraße rund fünf Mal mehr Treibhausgasemissionen pro beförderter Tonne und zurückgelegtem Kilometer als der Güterzug, der Verkehr über die Straße sogar das Zwanzigfache. Es zeigt sich trotz unterschiedlicher Emissionswerte ein paralleles Verhältnis zu den Ergebnissen der Langstrecke.

Den Schienenverkehr ausgenommen, liegt auch hier die Differenz von Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel Emissionen zwischen den einzelnen Transportmitteln bei circa 22 Prozent. Die graphische Darstellung der relativen Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel Emissionen aller Beförderungsmittel finden sich in Abbildung 32 und Abbildung 33.

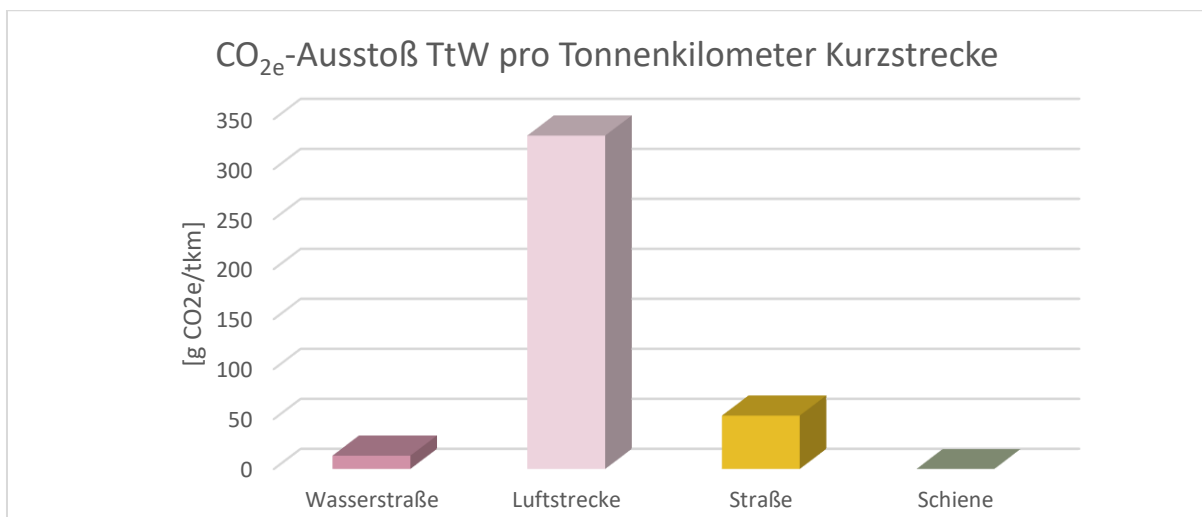


Abbildung 32: Vergleich des CO_{2e}-Ausstoß Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg.

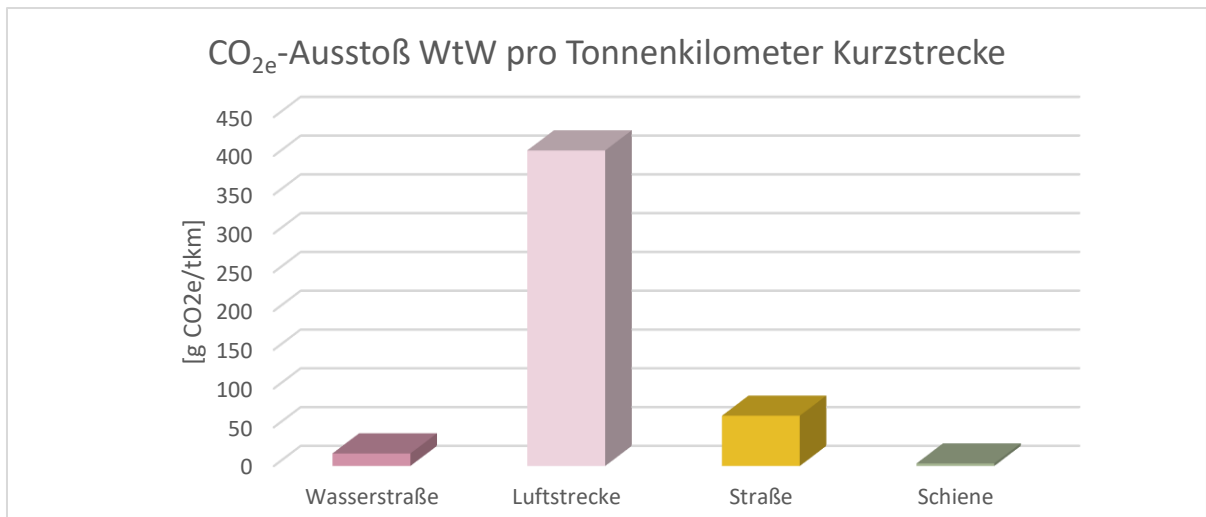


Abbildung 33: Vergleich des CO_{2e}-Ausstoß Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene auf der Strecke zwischen Rotterdam und Duisburg.

6.5 Vergleich der spezifischen Emissionshöhe zwischen Lang- und Kurzstrecke

Die Abbildung 34 soll als Übersicht über alle Ergebnisse der Emissionen pro Tonnenkilometer für alle Beförderungsmittel und Transportstrecken dienen. In der Graphik wird nochmals deutlich, dass der Transport über den Luftweg sowohl auf der Langstrecke als auch auf der Kurzstrecke mit Abstand den größten Treibhausgasausstoß pro Tonnenkilometer aufweist.

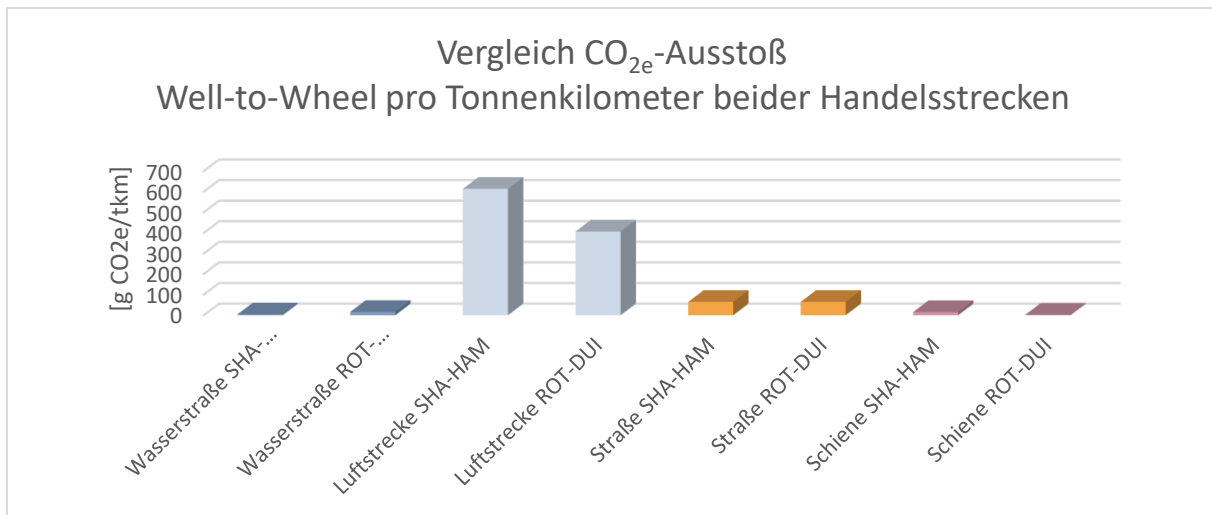


Abbildung 34: Vergleich des CO_{2e}-Ausstoß Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen Wasserstraße, Luftstrecke, Straße und Schiene beider Handelsstrecken.

Der Vergleich zwischen den beiden Wasserstraßen der Kurz- und Langstrecke zeigt auf, dass der relative Ausstoß in der Binnenschifffahrt mit 16,14 Gramm CO_{2e} pro tkm deutlich höher ist als jener der Containerschifffahrt mit 4,63 Gramm CO_{2e} pro tkm. Je nach Quelle liegt der errechnete Emissionswert der Binnenschifffahrt nah an den Literaturwerten oder deutlich darunter. Die angegebene Emissionsintensität aus der Treibhausgasstudie der International Maritime Organization (IMO) von 19,06 g CO₂/tkm für Containerschiffe von 0 bis 999 TEU liegt nah an dem hier errechneten Wert (International Maritime Organization, 2021, S. 181). Die Angabe des Umweltbundesamtes von einem Emissionsfaktor von 33 Gramm CO₂ pro tkm für die Binnenschifffahrt liegt jedoch deutlich über dem hier vorliegenden Wert (Umweltbundesamt, 2021b). Darüber hinaus können die Zahlen des Departments for Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA) herangezogen werden. Jene Abteilung der britischen Regierung veröffentlicht in jährlichem Abstand THG-Umrechnungsfaktoren für die Unternehmensberichterstattung, die es Organisationen ermöglichen, Treibhausgasemissionen verschiedenster Sektoren zu berechnen (UK Government, 2022). Hier liegt der Emissionsfaktor von Containerschiffen mit einer Ladekapazität von 0 bis 999 TEU 36,81 Gramm CO_{2e} pro tkm und ist damit mehr als doppelt so hoch wie die berechnete Emissionsintensität.

Betrachtet man den Emissionswert des Containerschiffs von 4,63 Gramm CO_{2e} pro tkm, zeichnet sich im Vergleich mit Literaturwerten ein ähnliches Bild ab wie bei der Binnenschifffahrt: Je nach Vergleich

liegt die ermittelte Emissionsintensität nah an den Standardwerten oder deutlich darunter. Vergleicht man den Emissionswert mit den Angaben des THG-Berechnungstool ESTEM (Einfache standardisierte Vorgehensweise zur Ermittlung eingesparter Treibhausgasemissionen von Projekten zur Materialeffizienz)¹⁹ von 11,9 Gramm CO_{2e} pro tkm für das Übersee-Containerschiff (VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2022) oder dem Emissionsfaktor von 12,67 Gramm CO_{2e} pro tkm für Containerschiffe über 8.000 TEU der DEFRA (UK Government, 2022), lässt sich eine klare Abweichung erkennen. Demgegenüber stehen Angaben von 2,94 Gramm CO_{2e} pro tkm für Rohöltanker mit über 200.000 Tonnen Tragfähigkeit aus den DEFRA-Werten (UK Government, 2022) und 4,46 Gramm CO_{2e} pro tkm für Rohöltanker mit 120.000 bis 199.999 Tonnen Transportkapazität aus ESTEM (VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2022). Die beiden letzten Werte sind nahezu deckungsgleich mit dem in der vorliegenden Arbeit ermittelten Wert. Und auch die Angaben der IMO Studie aus dem Jahr 2020 von einer Emissionsintensität von 4,26 gCO₂/tkm für Containerschiffe mit einer Ladekapazität von 20.000 oder mehr TEU bestätigt den hier ermittelten Wert (International Maritime Organization, 2021, S. 181).

Die Ursache für die Diskrepanz bezüglich der ersten beiden Standardwerte für Containerschiffe könnte darin liegen, dass bei der hier vorliegenden Berechnung von einer deutlich höheren Ladekapazität ausgegangen wird als in den Literaturwerten, da die Reedereien in den letzten Jahren immer wieder neue Kapazitätsrekorde erzielt haben: Im Jahr 2015 lag der Rekord noch bei 19.224 TEU Ladekapazität, 2020 erreichte das größte Containerschiff bereits knapp 24.000 TEU (Lemper, 2020). Gleichzeitig liegt die durchschnittliche Schiffsgröße der Container-Reedereien jedoch lediglich bei circa 7.000 TEU, ein deutlicher Unterschied zu den hier angenommenen 20.000 TEU Ladekapazität (DVZ, 2017).

Eindeutig ist im Vergleich zwischen Binnenschiff und Containerschiff in Abbildung 35 jedoch, dass das Verhältnis zwischen Treibstoffverbrauch pro Kilometer und Transportkapazität in der Containerschiffahrt günstiger ausfällt als bei der Binnenschiffahrt, das belegen auch die Werte aus der Literatur. Nichtsdestotrotz liegt auch die Binnenschiffahrt auf Platz drei der emissionsärmsten Beförderungsmittel hinsichtlich der Emissionsintensität nach dem Schienengüterverkehr und der Containerschiffahrt.

¹⁹ Das kostenlose ESTEM Berechnungstool wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz unter der Betreuung des VDI Ressourcenschutz erstellt und dient hauptsächlich dazu, die Klimawirksamkeit von Maßnahmen aus dem Bereich der betrieblichen Materialeffizienz abzuschätzen, es werden jedoch auch Emissionsfaktoren für den Gütertransport angegeben.

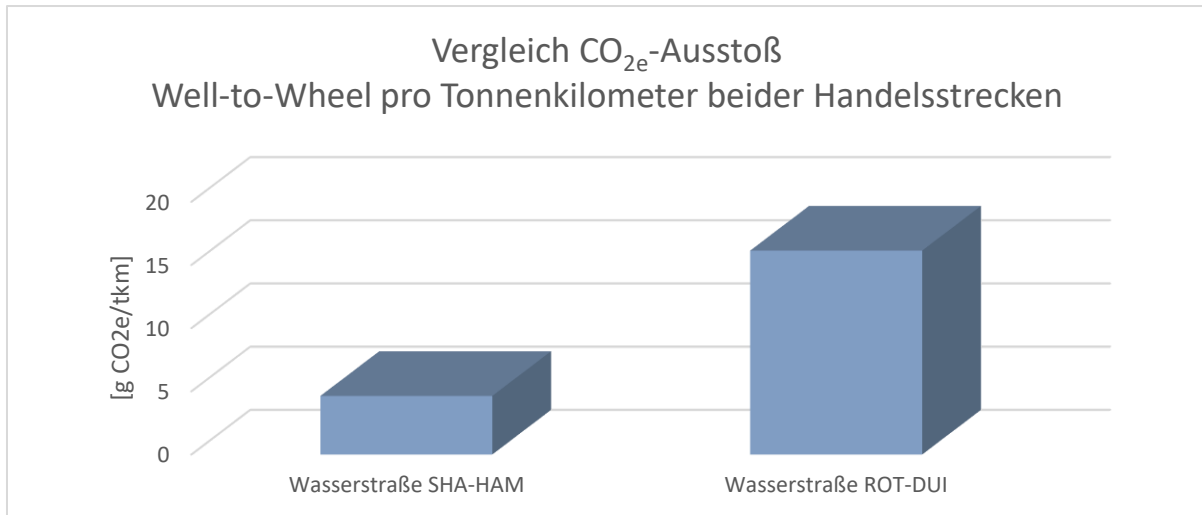


Abbildung 35: Vergleich des CO_{2e}-Ausstoß Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen den Wasserstraßen beider Handelsstrecken.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse für die Luftstrecke in Abbildung 36 fällt der CO_{2e}-Ausstoß bei der Kurzstrecke geringer aus als bei der Langstrecke. Der Grund hierfür liegt darin, dass bei der Kurzstrecke aufgrund der fehlenden Anflugpunkte in Duisburg zusätzlich der Lkw als Beförderungsmittel verwendet wurde, welcher durch seine geringeren Treibstoffverbräuche die Gesamtemissionen der Luftstrecke reduziert.

Vergleiche mit Literaturwerten zeigen, dass der in der vorliegenden Arbeit ermittelte Treibhausgasausstoß von 614 Gramm CO_{2e} pro tkm für die Langstrecke im Bereich der Emissionsfaktoren von 539 Gramm CO_{2e} pro tkm (UK Government, 2022) bis 811 Gramm CO_{2e} pro tkm liegt (VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2022). Der Unterschied zwischen DEFRA und ESTEM kann damit erklärt werden, dass in der Literatur nicht nur Frachtflugzeuge wie bei der vorliegenden Arbeit und DEFRA angenommen, sondern auch Passagierflugzeuge betrachtet werden, die eine deutlich geringere Beifrachtkapazität für die Güterbeförderung aufweisen als reine Frachtflugzeuge: Die durchschnittliche Beiladepazität von Flugzeugen für sonstige Fracht liegt zwischen elf und 19 Tonnen, das hier betrachtete Frachtflugzeug Boeing 777F kann hingegen Güter bis zu 103 Tonnen laden (IHK München, 2018).

Im Gegensatz zum Langstreckenflug weicht der ermittelte Wert von 407 Gramm CO_{2e} pro tkm bei der Kurzstrecke stark von den Literaturwerten von 811 bis 1.217,17 Gramm CO_{2e} pro tkm ab (VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2022); (UK Government, 2022).

Einerseits ist der gesamte Treibhausgasausstoß durch den Lkw-Transport auf der Teilstrecke geringer – dies herausgerechnet, ergäbe die Emissionsberechnung nur für das Flugzeug auf der Kurzstrecke jedoch den gleichen Emissionsfaktor wie bei der Luftstrecke von Shanghai nach Hamburg, anders als die Literaturwerte angeben. Im Vergleich zwischen ermittelten und Literaturwerten muss berücksichtigt werden, dass in der Literatur meist von höheren relativen Emissionen bei

Kurzstreckenflügen ausgegangen wird, da sich der erhöhte Treibstoffverbrauch des Starts mit dem Beschleunigungsvorgang auf eine kürzere Transportlänge verteilt als beim Langstreckenflug. Da die DIN EN 16258 jedoch nicht zwischen Kurz- und Langstrecke bei Flügen unterscheidet und lediglich mit demselben Emissionsfaktor g_w für Kerosin gearbeitet werden kann, ist ein abschließender Vergleich mit der Literatur nicht möglich. Trotz dessen ist interessant zu sehen, wie groß der Unterschied der Emissionsintensität tatsächlich ist, wenn eine Teilstrecke mit einem Beförderungsmittel zurückgelegt wird, der eine um den Faktor fünf geringere Transportkapazität hat, jedoch einen viel geringeren Kraftstoffverbrauch vorweist.

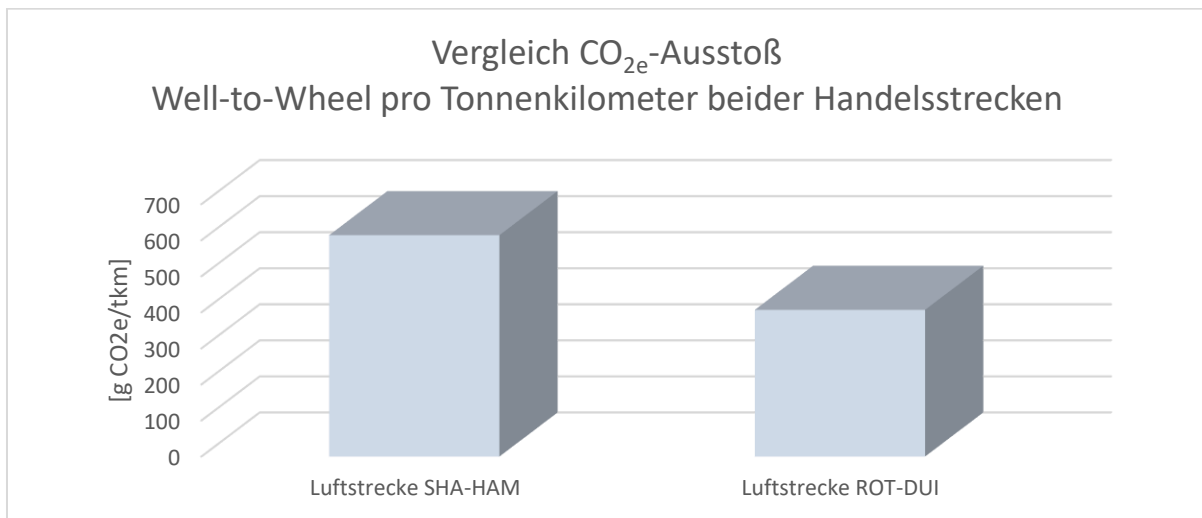


Abbildung 36: Vergleich des CO_{2e}-Ausstoß Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen den Luftstrecken beider Handelsstrecken.

Anders als im Schiffsverkehr und auf dem Luftweg lässt sich im Lkw-Transport kein Unterschied zwischen Langstrecke und Kurzstrecke feststellen (vgl. Abbildung 37), da sowohl die Kraftstoffart, der relative Kraftstoffverbrauch als auch die Transportkapazität bei beiden Strecken identisch waren und sich die Handelsstrecken lediglich durch ihre Transportlänge unterscheiden, welche jedoch durch das Teilen der absoluten Emissionen durch die Transportleistung herausgekürzt wurden.

Die vorliegenden Emissionsergebnisse im Straßengüterverkehr von 64,8 Gramm CO_{2e} pro tkm liegen niedriger als vergleichende Literaturwerte mit Angaben von 79,36 Gramm CO_{2e} pro tkm für Lkw ab 3,5 Tonnen (Umweltbundesamt, 2021b) bis 80,32 Gramm CO_{2e} pro tkm bei Lkw über 33 Tonnen und durchschnittlicher Beladung (UK Government, 2022) oder auch 87,3 Gramm CO_{2e} pro tkm für Lkw über 7,5 Tonnen (VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2022); alle Werte bewegen sich jedoch in einem ähnlichen Rahmen.

Eine mögliche Ursache für die Diskrepanz sind die Annahmen niedriger Transportkapazitäten in der Literatur: Besonders die Werte des Umweltbundesamtes und ESTEM fallen sehr viel höher aus, vermutlich da sich die Emissionsfaktoren in den dortigen Angaben auf Lkw über 3,5 und 7,5 Tonnen beziehen. Hier werden jedoch Ladekapazitäten von 20 Tonnen angenommen und damit die

Berechnungen durchgeführt. Durch die größere Menge an transportierten Tonnen erhält man schließlich einen geringeren Emissionsfaktor pro Tonnenkilometer.

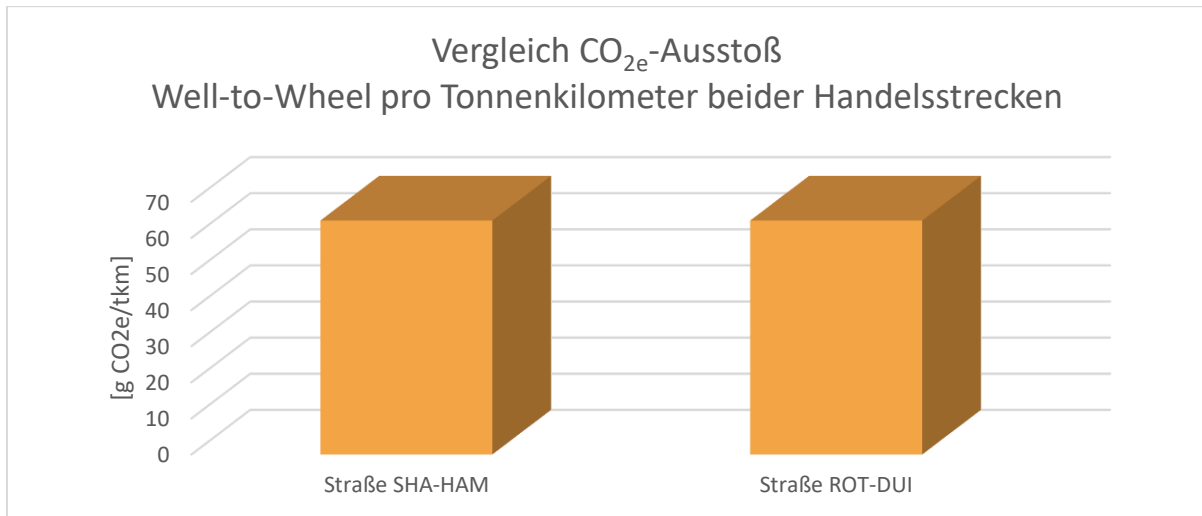


Abbildung 37: Vergleich des CO_{2e}-Ausstoß Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen den Landwegen beider Handelsstrecken.

Ein besonderer Fall im Vergleich zwischen den beiden Handelsstrecken bietet der Schienengütertransport. In den Ergebnissen, die in Abbildung 38 graphisch dargestellt werden, sind deutliche Unterschiede zwischen der Kurz- und Langstrecke ersichtlich, obwohl sowohl die Transportkapazität als auch der relative Stromverbrauch identisch sind. Erklären ist dies mit den unterschiedlichen Quellen zur Stromgewinnung: der wesentlich höhere Bahnstromemissionsfaktor der Langstrecke als jener der Kurzstrecke ist für die Diskrepanz verantwortlich. Bis auf Belarus und Deutschland stammt in den Ländern, die die interkontinentale Handelsstrecke umfasst, mehr als zwei Drittel der Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern wie Diesel und Kohle (vgl. Tabelle 21). Dies macht sich in einem hohen Emissionsfaktor für Strom bemerkbar – der sogar noch höher ist, als würde man Diesel oder Kohle als direkten Energieträger verwenden²⁰. Demgegenüber steht ein sehr geringer Bahnstromemissionsfaktor für die Kurzstrecke, da Deutschland mit 21 Prozent einen vergleichsweise geringen Anteil an fossilen Energieträgern für die Stromerzeugung aufweist, und die Niederlande bereits einen Strombezug aus 100 Prozent erneuerbaren Energien erreichen konnte. Die beiden stark voneinander abweichenden Gegebenheiten machen sich letztendlich in den Emissionswerten bemerkbar: Es fallen 15,27 Gramm CO_{2e} pro tkm auf der Langstrecke und 3,29 Gramm CO_{2e} pro tkm

²⁰ Die Emissionsfaktoren von fossilen Energieträgern wie Diesel und Kohle für die Stromerzeugung sind noch höher als die Emissionsfaktoren bei der direkten Nutzung als Energieträger, da bei der Stromerzeugung ein niedrigerer Wirkungsgrad durch Verluste bei Umwandlungsprozessen und dem Transport des Stroms vorherrscht.

auf der Kurzstrecke an. Die Standardwerte aus DEFRA, ESTEM und Angaben des Umweltbundesamts bewegen sich wie das Ergebnis der Langstrecke in einem zweistelligen Bereich: 17 Gramm CO_{2e} pro tkm laut Umweltbundesamt, 18 Gramm CO_{2e} pro tkm nach Angaben von ESTEM bis zu 27,8 Gramm CO_{2e} pro tkm als Emissionsfaktor der DEFRA (Umweltbundesamt, 2021b); (VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2022); (UK Government, 2022).

Die Ursache für die Diskrepanz in den Daten verschiedener Quellen kann einerseits erneut in den unterschiedlich hohen Transportkapazitäten liegen, die für die jeweiligen Berechnungen zugrunde lagen, andererseits wird hier auch entscheidend sein, welcher Bahnstrommix mit sich daraus ergebendem Emissionsfaktor angenommen wurde.

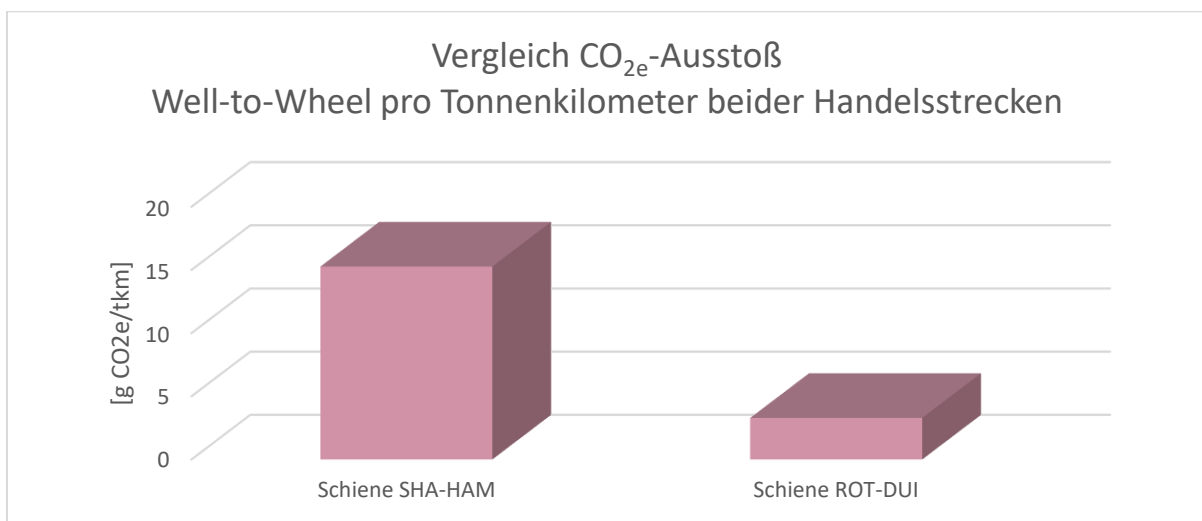


Abbildung 38: Vergleich des CO_{2e}-Ausstoß Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer zwischen den Schienenstrecken beider Handelsstrecken.

6.6 Vergleich der allgemeinen Emissionsfaktoren für die Kurz- und Langstrecke

Die abschließende Gegenüberstellung der in der vorliegenden Arbeit betrachteten Handelsstrecken bezieht die Verteilung der Verkehrsleistung auf verschiedene Beförderungsmittel bei Importen nach Deutschland mit ein, welche sich zwischen Importen aus EU-Mitgliedstaaten und jener aus Drittstaaten unterscheidet. Abbildung 39 stellt die berechneten Emissionsfaktoren für die beiden Handelsstrecken gegenüber. Dabei wurden die Anteile an der Gesamtverkehrsleistung jedes Verkehrsträgers zunächst mit ihrem Emissionsfaktor für die jeweilige Strecke multipliziert und die Faktoren miteinander addiert, um abschließend einen allgemeinen Emissionsfaktor zu erhalten. Dieser Vorgang resultiert in einem allgemeinen Emissionsfaktor für die Langstrecke von 13,68 Gramm CO_{2e} pro tkm; für die Kurzstrecke beträgt der Wert 47,15 Gramm CO_{2e} pro tkm.

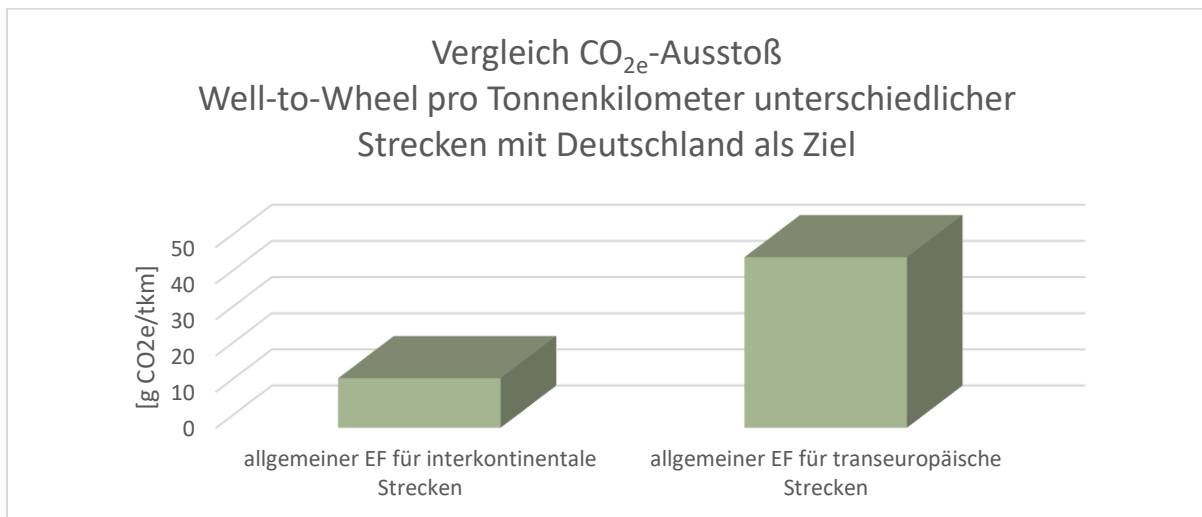


Abbildung 39: Vergleich des allgemeinen Treibhausgasemissionsfaktor der beiden Handelsstrecken.

Die Hauptursache für den deutlichen Unterschied in der Emissionshöhe zwischen den beiden Strecken liegt darin, dass mit einem Anteil von knapp 90 Prozent die meisten Güter aus Drittstaaten mit dem Containerschiff transportiert werden. Wie bereits in den vorigen Abschnitten erläutert, ist durch die mit Abstand höchste Transportkapazität der relative CO_{2e}-Ausstoß im Seeverkehr relativ gering. Im Gegensatz dazu ist der Lkw mit knapp rund 65 Prozent das bevorzugte Beförderungsmittel bei Importgütern aus EU-Mitgliedstaaten, welcher einen vergleichsweise hohen CO_{2e}-Ausstoß pro beförderter Tonne und zurückgelegtem Kilometer aufweist (vgl. Tabelle 28).

Obwohl der allgemeine Emissionsfaktor für die Langstrecke deutlich geringer ist, kann hieraus nicht abgeleitet werden, Importe aus Drittstaaten gegenüber Kurzstrecken zu favorisieren und als klimaschonender zu bewerten; es sollte dagegen nicht außer Acht gelassen werden, dass die absoluten Emissionen um so höher ausfallen, je länger die Transportstrecke ausfällt. Stattdessen soll der Vergleich viel mehr verdeutlichen, dass das Potenzial gerade bei Kurzstrecken sehr groß ist, hier

Treibhausgasemissionen zu reduzieren, indem der Lkw-Transport reduziert und der Gütertransport auf Verkehrsträger verlagert wird, welche, wie das Binnenschiff, über deutlich höhere Transportkapazitäten verfügen und damit einen niedrigeren relativen CO_{2e}-Ausstoß vorweisen. Der größte Fokus sollte jedoch darin liegen, in Beförderungsmittel zu setzen, die sowohl absolut als auch relativ betrachtet wenig Treibhausgasemissionen freisetzen: Mit dem elektrifizierten Schienengüterverkehr als Hauptverkehrsträger, angetrieben mit Strom aus regenerativen Energieträgern, können die relativen Treibhausgasemissionen in Gramm CO_{2e} pro Tonnenkilometer auf Kurzstrecken in den einstelligen Bereich fallen.

7 Diskussion und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit sollten Fragestellungen zu Gemeinsamkeiten und Unterschieden bei der Berechnung und dem Vergleich spezifischer und allgemeiner Treibhausgasemissionsfaktoren im Gütertransport auf zwei unterschiedlichen Handelsstrecken, zum Einfluss der Transportmittelverteilung von Importen nach Deutschland auf die Höhe der Treibhausgasemissionsfaktoren für die beiden Handelsstrecken sowie zum Einfluss des derzeitigen Strommix der betrachteten Strecken auf die Höhe der Treibhausgasemissionen im Schienengüterverkehr untersucht werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Fragestellungen aufgezeigt und diskutiert.

Die erste Fragestellung sollte Gemeinsamkeiten und Unterschiede anhand der Berechnung und dem Vergleich spezifischer und allgemeiner Treibhausgasemissionsfaktoren im Gütertransport auf Grundlage der DIN EN 16258 auf einer innereuropäischen und einer transkontinentalen Handelsstrecke des 21. Jahrhundert erfassen. Unterschiede lassen sich teilweise in der Art des Verkehrsträgers feststellen. Das Zurücklegen der Strecke über die Wasserstraße der betrachteten Kurzstrecke erfolgt mittels Binnenschiffs, da der Rhein als Binnengewässer die Wasserstraße darstellt. Auf der Langstrecke ist es dagegen charakteristisch, dass Güter mit Überseeschiffen bzw. Containerschiffen transportiert werden. Die unterschiedlichen Schiffsarten wirken sich aufgrund deutlicher Unterschiede in den Transportkapazitäten sowie im verwendeten Kraftstoff auch auf die berechnete Emissionshöhe aus. Wenngleich der Kraftstoff des Containerschiffes einen höheren Emissionsfaktor aufweist als das dieselbetriebene Binnenschiff, so folgt aus der deutlich höheren Transportkapazität des Containerschiffs dennoch eine wesentlich niedrigere Emissionsintensität. Neben der Wahl des Verkehrsträgers resultieren auch rein streckenbedingte Unterschiede in abweichende Emissionshöhen. Im elektrifizierten Schienengüterverkehr ergeben sich diese durch den jeweiligen Strommix der Streckenländer, welcher der Bahn zur Verfügung gestellt wird.

Kein Unterschied war dagegen dann feststellbar, wenn die Art der Strecke keinen Einfluss auf Parameter wie der Kraftstoffart, der Ladekapazität sowie der Kraftstoffquelle nehmen konnte. Dies war im Gütertransport via Lkw der Fall: hier zeigte sich ein gleichbleibender spezifischer THG-Emissionsfaktor sowohl für die Lang- als auch für die Kurzstrecke. Dieses Ergebnis hätte sich auch im Flugverkehr gezeigt, wenn im Fall der Kurzstrecke nicht ein Teil der Strecke via Lkw erbracht werden müsste. Deshalb können die Ergebnisse des Flugverkehrs nicht abschließend bewertet werden.

Auch die Frage nach dem Einfluss der derzeitigen Transportmittelverteilung von Importen nach Deutschland je nach Exportland auf die Höhe der allgemeinen Treibhausgasemissionsfaktoren für die innereuropäische und die transkontinentale Handelsstrecke sowie der etwaigen Feststellung von Unterschieden anhand der Berechnung dieser beiden Emissionsfaktoren konnte hinreichend

beantwortet werden: Die vorherrschende, unterschiedliche Verteilung der Transportleistung je nach Exportland führt dazu, dass Kurzstrecken im Transportquerschnitt höhere relative Emissionen vorweisen als die Langstrecke. Hierbei ist wichtig zu beachten, dass keine falsche Bewertung der Ergebnisse vollzogen wird: Mit den Ergebnissen wird nicht aufgezeigt, dass Langstreckentransporte weniger klimabelastend sind als Gütertransporte auf Kurzstrecken. Beachtet man die absoluten Emissionen der Kurz- und Langstrecke, zeigt sich über alle Verkehrsträger hinweg ein deutlich höherer THG-Ausstoß auf der Langstrecke. Stattdessen liegt der Grund für die niedrigere spezifische Emissionshöhe des allgemeinen Emissionsfaktors für die Langstrecke darin, dass mit einem Anteil von knapp 90 Prozent die meisten Güter aus Drittstaaten mit dem Containerschiff transportiert werden, welches durch die mit Abstand höchste Transportkapazität eine vergleichsweise niedrige Emissionsintensität vorweist. Im Gegensatz dazu ist der Lkw mit einem im Vergleich hohen CO_2e -Ausstoß pro beförderter Tonne und zurückgelegtem Kilometer das bevorzugte Beförderungsmittel bei Importgütern aus EU-Mitgliedstaaten. Eine Verlagerung des innereuropäischen Gütertransports weg vom Straßenverkehr hin zum elektrifizierten, mit erneuerbaren Energien angetriebenen Schienenverkehr könnte folglich dieses bestehende Verhältnis zwischen Lang- und Kurzstrecke umkehren. Es zeigt sich, dass Kurzstreckentransporte ein deutlich höheres Potenzial aufweisen, ihre THG-Emissionen wesentlich zu reduzieren als Langstrecken, denn Containerschiffskapazitäten und damit niedrigere relative Emissionen können nicht unbegrenzt gesteigert werden.

Die dritte Fragestellung dieser Arbeit bezog sich auf den Einfluss des derzeitigen jeweiligen Strommix aller Durchfahrtsländer der betrachteten Handelsstrecken auf die Höhe der Treibhausgasemissionen im Schienengüterverkehr und welche Auswirkungen diese auf die Bewertung des Schienengüterverkehrs im Vergleich zum Schiffs-, Flug- und Straßengüterverkehr hinsichtlich der Emissionsintensität haben. Die vorliegenden Ergebnisse zeigten diesbezüglich deutliche Unterschiede zwischen der Kurz- und Langstrecke. Erklären ist dies mit den unterschiedlichen Quellen zur Stromgewinnung: Der viel höhere Bahnstromemissionsfaktor der Langstrecke als jener der Kurzstrecke ist für die Diskrepanz verantwortlich. Bis auf Belarus und Deutschland stammt in den Ländern, die die interkontinentale Handelsstrecke umfasst, mehr als zwei Drittel der Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern wie Diesel und Kohle. Dies macht sich in einem hohen Emissionsfaktor für Strom bemerkbar. Demgegenüber steht ein sehr geringer Bahnstromemissionsfaktor für die Kurzstrecke, da Deutschland mit 21 Prozent einen vergleichsweise geringen Anteil an fossilen Energieträgern für die Stromerzeugung aufweist, und die Niederlande bereits einen Strombezug aus 100 Prozent erneuerbaren Energien erreichen konnte. Die beiden stark voneinander abweichenden Gegebenheiten machen sich letztendlich in den Emissionswerten bemerkbar: Es fallen 15,27 Gramm CO_2e pro tkm auf der Langstrecke und 3,29 Gramm CO_2e pro tkm auf der Kurzstrecke an.

Im Vergleich mit den anderen Verkehrsträgern konnte gezeigt werden, dass die relativen Emissionswerte des Schienenverkehrs auf der betrachteten Langstrecke sogar etwas höher ausfielen als die Emissionen des Containerschiffes. Dieses Ergebnis macht deutlich, dass der elektrifizierte Schienenverkehr allein nicht automatisch das emissionsärmste Beförderungsmittel ist, sondern nur in Kombination mit einer Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien das Potenzial, das mit Abstand emissionsärmste Güterverkehrsmittel zu sein, ausschöpfen kann. Trotz dessen liegt die Emissionsintensität des Schienengüterverkehrs auch mit einem Strommix aus überwiegend fossilen Energieträgern im Vergleich zu den übrigen Verkehrsträgern deutlich unter der jeweiligen spezifischen Emissionshöhe von Binnenschiff, Lkw und Flugzeug.

Es ist jedoch wichtig, kritisch mit den Ergebnissen umzugehen und mögliche Fehlerquellen zu berücksichtigen. Auffällig bei den ermittelten Emissionswerten ist zunächst, dass diese bei nahezu allen Beförderungsmitteln niedriger ausfallen als jene aus den für einen Vergleich herangezogene Quellen. Es ist möglich, dass Literaturwerte auch Leerfahrten²¹ von Containertransporten in ihren Emissionsberechnungen berücksichtigen, welche in der vorliegenden Arbeit aufgrund einer fehlender Datenlage nicht einkalkuliert wurden. Unabhängig von dem Vergleich zwischen Literaturwerten und den hier vorliegenden Emissionsberechnungen stellt dieser Aspekt eine Abweichung des tatsächlichen THG-Emissionsausstoß in der Logistik dar. Ein weiterer Faktor, der berücksichtigt werden muss, ist der Spielraum bei Kraftstoffverbrauchsdaten. Da es keinen direkten Zugriff auf gemessene Werte gibt, müssen Durchschnittswerte verwendet werden, die je nach Quelle Abweichungen enthalten und nie eindeutig sein können; gerade topographische Unterschiede der beiden Strecken wurden somit nicht im Kraftstoffverbrauch berücksichtigt. Weiterhin ist festzustellen, dass günstige Annahmen zu Transportkapazitäten gemacht wurden, insbesondere im Schiffs- und Flugtransport. Bei Flugzeugtransporten wird die Fracht oft als Bellyfracht mit deutlich geringeren Ladekapazitäten transportiert, und lediglich die größten Containerschiffe der Welt bewegen sich im Bereich von 20.000 TEU Ladekapazität. Ungeachtet dessen zeigen die Daten, dass der Luftverkehr trotz günstiger Annahmen die höchsten relativen Emissionen ausstößt und dass sich der Schienenverkehr trotz mehrheitlich fossiler Energieträger in der Stromgewinnung auf der Langstrecke näher an den spezifischen Emissionswerten des Containerschiffs befindet als an den Verkehrsträgern Lkw und Frachtflugzeug.

²¹ Leerfahrten sind Transportfahrten, die ohne Fracht erfolgen. Sie kommen beispielsweise zustande, wenn ein Gütertransport mittels Container erfolgt ist und der Container anschließend unbeladen wieder zurück an den Sender der Fracht transportiert werden muss.

Schließlich wird darauf hingewiesen, dass der THG-Ausstoß allein nicht ausreicht, um ein Beförderungsmittel als klima- oder umweltfreundlich zu bewerten. Andere Schadstoffe wie der Ausstoß von Feinstaub und Rußpartikeln müssten beispielsweise ebenfalls berücksichtigt werden, um vollständigere Aussagen hinsichtlich der Klimafreundlichkeit zu treffen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit haben daher keinen Anspruch darauf, eine ganzheitliche Bewertung der Transportarten zu vollziehen. Es wird empfohlen, weitere Forschungsfragen zu untersuchen, wie die ganzheitliche Betrachtung der Emissionen von Beförderungsmitteln, nicht nur der Treibhausgase, sondern auch anderen Luftschadstoffen und ihre Auswirkungen auf die Umwelt und das Klima. Darüber hinaus sollten weitere Transportmodalitäten miteinander verglichen werden, wie etwa die THG-Emissionshöhe von gekühltem Transport oder eventuell auftretender Unterschiede in der Emissionshöhe beim Transport verschiedener Arten von Gütern.

Um die vorliegende Arbeit weiterzuführen, sollte auch der Vor- und Nachlauf von Transporten miteinbezogen werden. Auch könnten Szenarien im Modell entworfen werden, um zu untersuchen, wie hoch die spezifischen Emissionen mit dem Schienenverkehr als Hauptverkehrsträger auf europäischen Kurzstrecken im Vergleich zur jetzigen Verkehrsmittelverteilung ausfallen würden. Schließlich sollten auch die Einsparpotenziale an Gesamtemissionen durch den elektrifizierten, mit erneuerbaren Energien betriebenen Schienengüterverkehr auf europäischen Strecken im Vergleich zum jetzigen Stand untersucht werden. Hierzu konnte bisher keine einschlägige Literatur gefunden werden, sodass eine tiefergehende Forschung in diesen Bereichen von Interesse sein könnte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die vorliegende Arbeit aufzeigen konnte, wie wichtig eine detaillierte Darstellung der Transportemissionen für die Entwicklung von Emissionsreduktionsstrategien ist, aber auch, dass es kaum möglich ist, über Durchschnittswerte reale und eindeutige Emissionswerte abzubilden. Die Implementierung der vorliegenden Ergebnisse in das *matter+s* Datenmodell kann hierfür jedoch als erste Näherung angesehen werden. Darüber hinaus bestätigt die Arbeit die entscheidende Bedeutung des Ausbaus erneuerbarer Energien für eine nachhaltige Stromgewinnung im Hinblick auf die Elektrifizierung des Schienenverkehrs. Dies ist ein wichtiger Schritt in Richtung einer Verkehrswende hin zu einem emissionsarmen (Güter-)verkehr.

8 Literaturverzeichnis

- Achten, N. (2016). *Schwimmende Riesen: Die 3 größten Containerschiffe der Welt*.
https://www.chip.de/news/Schwimmende-Riesen-Die-3-groessten-Containerschiffe-der-Welt_90836453.html
- Allekotte, M., Bergk, F., Biemann, K., Deregowski, C., Knörr, W., Althaus, H.-J., Sutter, D. & Bergmann, T. (2020). *Ökologische Bewertung von Verkehrsarten*. Dessau-Roßlau.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_156-2020_oekologische_bewertung_von_verkehrsarten_0.pdf
- Allianz pro Schiene (Hrsg.). (2016). *Überblick: Wie der Güterzug länger werden kann*.
<https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/aktuell/740-meter-gueterzug/>
- Allianz pro Schiene. (2022, 12. Dezember). *Übersicht: Alle Informationen zum Güterverkehr auf der Schiene*. <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/gueterverkehr/>
- Alphaliner. (2022). *Umschlagvolumen der größten Containerhafen der Welt im Jahr 2021 (in Millionen TEU)*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/29697/umfrage/umschlagvolumen-der-groessten-containerhaefen-der-welt/>
- Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H. & Furmans, K. (2008). *Handbuch Logistik*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72929-7>
- Baumgarten, H. (2008). *Das Beste der Logistik*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-78405-0>
- BDBe (Hrsg.). *Umrechnungsformeln für Biokraftstoffe*. <https://www.bdbe.de/daten/umrechnung-und-formeln>
- Beckmann, H. (2004). *Supply Chain Management*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-17057-7>
- Benetka, M. (2009). *Die Bedeutung von CO₂-Emissionen für die Transport- und Logistikbranche* [Diplomarbeit]. Wirtschaftsuniversität Wien, Wien.
<https://research.wu.ac.at/en/publications/die-bedeutung-von-co2-emissionen-f%C3%BCr-die-transport-und-logistikbr-3>
- Blanck, R., Kasten, P., Hacker, F. & Mottschall, M. *Treibhausgasneutraler Verkehr 2050: Ein Szenario zur zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr*.
<https://www.oeko.de/oekodoc/1829/2013-499-de.pdf>
- BMDV (Hrsg.). (2021). *Mit der Elektrobahn klimaschonend in die Zukunft – Das Bahn-Elektrifizierungsprogramm des Bundes*.
<https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-aktuell/elektrobahn-klimaschonend-zukunft-bahn-elektrifizierungsprogramm.html>

- bpb. (2017). *Luftfracht*. <https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/globalisierung/52528/luftfracht/>
- Brenschede, A. *BRouter-Web* (Version 0.18.1) [Computer software]. https://brouter.de/brouter-web/#map=3/71.39/77.17/osm-mapnik-german_style&lonlats=121.434889,31.257936;82.575989,45.17042;61.669006,54.003039;30.990028,54.682131;23.628845,52.089518;14.577484,52.322525;10.008545,53.550476&profile=rail
- Brockmann, D. (2013). *Ansatz zur Bestimmung des Carbon Footprint für die Distributionslogistik von Fast Moving Consumer Goods mit Hilfe von Simulation*. TU Dortmund.
http://www.itpl.mb.tu-dortmund.de/publikationen/files/MA_2013_Brockmann.pdf
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.). (2016). *Umweltbericht zum Bundesverkehrswegeplan: Strategische Umweltprüfung zum Bundesverkehrswegeplan 2030*. Hannover. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/BVWP/bvwp-2030-umweltbericht.pdf?__blob=publicationFile
- Bußgeldkatalog 2023 (Hrsg.). (2023). *Zuladung beim LKW: Was dürfen Sie transportieren?*
<https://www.bussgeldkatalog.org/zuladung-lkw/>
- Büter, C. (2017). *Außenhandel: Grundlagen internationaler Handelsbeziehungen* (4. Aufl.). Springer-Lehrbuch. Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54149-4>
- Capital & Maritime Executive. (2022). *Ausgewählte Kennzahlen zum Suezkanal (Stand: 2021)*.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/191528/umfrage/ausgewaehlte-kennzahlen-zum-sueskanal/>
- China Government Network (Hrsg.). (2022). *2021 Statistical Bulletin on the Development of the Transportation Industry*. http://www.gov.cn/shuju/2022-05/25/content_5692174.htm
- Dagkinis, I. & Nikitakos, N. (2015). *Slow steaming options investigation using multi criteria decision analysis method*. Griechenland. University of Aegean, Department of Shipping, Trade and Transport.
https://www.researchgate.net/publication/281495086_SLOW_STEAMING_OPTIONS_INVESTIGATION_USING_MULTI_CRITERIA_DECISION_ANALYSIS_METHOD
- Dahlke-Wallat, F., Friedhoff, B. & Ley, J. (2022). *Alternative Kraftstoffe und Antriebstechnologien für Binnenschiffe.: Ein Überblick*. <https://www.wko.at/branchen/w/transport-verkehr/schifffahrt/alternative-kraftstoffe-und-antriebstechnologien.pdf>
- DB (Hrsg.). (2023, 11. Januar). *DB Energie - Energiewendetreiber: 2021: 62% im DB-Bahnstrommix*.
<https://www.dbenergie.de/dbenergie-de/2021-62-im-DB-Bahnstrommix-4362320>

- Deckert, C. (Hrsg.). (2021). *Management-Reihe Corporate Social Responsibility. CSR und Logistik: Spannungsfelder Green Logistics und City-Logistik* (2. Aufl.). Springer Gabler.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-63570-4>
- Deutscher Bundestag. (2022, 7. Juli). *Einzelfragen zu CO2-Emissionen ausgewählter Energieträger*.
<https://www.bundestag.de/resource/blob/906364/999d732a423a0b87386c0bd7b2f5f064/WD-8-037-22-pdf-data.pdf>
- Duisport AG (Hrsg.). *duisport: Zahlen, Daten, Fakten: Hafeninformation*.
<https://www.duisport.de/hafeninformation/>
- DVZ. (2017). *Durchschnittliche Schiffsgröße ausgewählter Container-Reedereien weltweit: Stand: 1. Halbjahr 2017; in TEU*.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/755615/umfrage/durchschnittliche-schiffsgroesse-ausgewaehlter-container-reedereien/?locale=de>
- EU transport in figures: Statistical pocketbook 2021*. (2021). *Transport in figures: Bd. 2021*. Publications Office of the European Union.
- Europäische Kommission (Hrsg.). (2019, 11. Dezember). *Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Der europäische Grüne Deal*. Brüssel.
https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF
- Eurostat (Hrsg.) (2021). *Trade in goods by top 5 partners, European Union, 2021 (in %)*.
<https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/international-trade-in-goods/visualisations>
- FIS Mobilität und Verkehr (Hrsg.). (2010). *Unterschiedliche Spurweiten im europäischen Eisenbahnsystem*. <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/325077/>
- FIS Mobilität und Verkehr (Hrsg.). (2019). *Transportmengensteigerung auf Hauptabfuhrstrecken*.
<https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/436561/>
- FIS Mobilität und Verkehr (Hrsg.). (2021). *Güterstruktur in der deutschen Binnenschifffahrt*.
<https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/123494/>
- FIS Mobilität und Verkehr (Hrsg.). (2022). *Containerschifffahrt*.
<https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/11171/>
- Fluent Cargo. (2023a, 4. Januar). *Routing*.
<https://www.fluentcargo.com/search?o=Shanghai,%20China&d=Hamburg,%20Germany>
- Fluent Cargo (Hrsg.). (2023b, 6. Januar). *Routing: Rotterdam (NLRTM) to Duisburg, Germany*.
[https://www.fluentcargo.com/search?o=Rotterdam%20\(NLRTM\)&d=Duisburg,%20Germany](https://www.fluentcargo.com/search?o=Rotterdam%20(NLRTM)&d=Duisburg,%20Germany)
- Fraunhofer ISE (Hrsg.). (2023). *Öffentliche Nettostromerzeugung in Polen 2022*. https://energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=PL&year=2022&interval=year

- Garrett, C., Bormans, M. & Thompson, K. (1990). Is the Exchange through the Strait of Gibraltar Maximal or Submaximal? In L. J. Pratt (Hrsg.), *The Physical Oceanography of Sea Straits* (S. 271–294). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0677-8_13
- Ghazvinei, P. T., Darvishi, H. H. & Bhatia, A. (2018). Sustainable Power Generation by Tidal Current Turbine in Straits of Malacca. *MATEC Web of Conferences*, 198, 4004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819804004>
- Gunda Schwantje (13. Dezember 2021). Das Tor zur Welt. *Bundeszentrale für politische Bildung*. <https://www.bpb.de/themen/europaeische-geschichte/geschichte-im-fluss/135700/das-tor-zur-welt/>
- Hannah Ritchie, Max Roser & Pablo Rosado (2022). Energy. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/renewable-energy>
- Hapag-Lloyd (Hrsg.). (2023). *Allgemeine Containerinformationen: 20' Standard*. <https://www.hapag-lloyd.com/de/services-information/cargo-fleet/container/20-standard.html>
- IEA & UIC. (2017). *Railway handbook 2017: Railway energy consumption and railway energy fuel mix*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/c015f563-ddba-485c-b788-3110d2b1d30e/handbook_iea-uic_2017_web3.pdf
- IFEU. (2013, 30. November). *Aktualisierung der Emissionsberechnung für die Binnenschifffahrt und Übertragung der Daten in TREMOD*. <https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/IFEU-INFRAS-2013-Aktualisierung-der-Emissionsberechnung-f%C3%BCr-die-Binnenschifffahrt-und-%C3%9Cbertragung-der-Daten-in-TREMOD3.pdf>
- IHK Hamburg (Hrsg.). (2019). *Belt and Road Initiative: Chinas Konnektivitätsstrategie*. IHK Hamburg. <https://www.ihk.de/hamburg/produktmarken/beratung-service/international/laenderinformationen/asien/belt-and-road-initiative-4399208>
- IHK München (2018). Luftfrachtstudie. <https://www.ihk-muenchen.de/ihk/documents/Service-Verkehr/Luftfrachtstudie.pdf>
- Informationsstelle Binnenschifffahrt (Hrsg.). (2021). *Schiffstypen*. https://bureauvoorlichtingbinnenvaart.nl/wp-content/uploads/2021/04/Scheepstypes_BVB_nieuw1.pdf
- IPCC (2016). *Klimaänderung 2013/2014: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Beiträge der drei Arbeitsgruppen zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Deutsche Übersetzungen durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, ProClim, Bonn/Wien/Bern*. https://www.de-ipcc.de/media/content/AR5-SPM_Anhang.pdf

- International Maritime Organization (Hrsg.). (2021). *Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020*.
<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf>
- ISO. (2023). *ISO 14083:2023*. <https://www.iso.org/standard/78864.html>
- Jarosz, E., Murray, S. P. & Inoue, M. (2005). Observations on the characteristics of tides in the Bab el Mandab Strait. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C3).
<https://doi.org/10.1029/2004JC002299>
- Kortus-Schultes, D. & Ferfer, U. (2005). *Logistik und Marketing in der Supply Chain*. Gabler Verlag.
<https://doi.org/10.1007/978-3-322-82301-4>
- Kraftfahrtbundesamt (2022). Fahrzeugzulassungen (FZ), Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen.
https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ13/fz13_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Kuhn, A. & Hellingrath, B. (Hrsg.). (2002). *Supply Chain Management*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-10141-4>
- Kuhn, B. (2019). Chinas Neue Seidenstraße. *Wirtschaftsdienst*, 99(12), 880–882.
<https://doi.org/10.1007/s10273-019-2544-3>
- Leerkamp, B. (2020). *Welchen Beitrag kann die Raumplanung zu einem nachhaltigen Güterverkehr leisten?* (Wechselwirkungen von Mobilität und Raumentwicklung im Kontext gesellschaftlichen Wandels Nr. 14). Hannover. https://www.arl-net.de/system/files/media-shop/pdf/fb/fb_014/06_leerkamp.pdf
- Lemper, B. (2020). *Wie groß ist zu groß?*
<https://www.dvz.de/rubriken/see/container/detail/news/wie-gross-ist-zu-gross.html>
- Logistische Informationssysteme AG (Hrsg.). (2021, 12. November). *Intermodaler Verkehr*.
<https://www.lis.eu/lexikon/intermodaler-verkehr/>
- Lufthansa Cargo (Hrsg.). (2023a). *Die Flotte, die Ihre Fracht ans Ziel bringt*. <https://lufthansa-cargo.com/de/fleet-ulds/fleet>
- Lufthansa Cargo (Hrsg.). (2023b). *Unsere B777F: der umweltfreundlichste Frachter der Welt*.
<https://lufthansa-cargo.com/de/fleet-ulds/fleet/b777f>
- Mensen, H. (2013). *Handbuch der Luftfahrt* (2. Aufl.). VDI/-Buch]. Springer Vieweg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-34402-2>
- MERICS Mercator Institute for China Studies (Hrsg.). (2018). *Die Vermessung der Belt and Road Initiative: Eine Bestandsaufnahme*. MERICS Mercator Institute for China Studies.
<https://www.merics.org/de/tracker/die-vermessung-der-belt-and-road-initiative-eine-bestandsaufnahme>

- Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg. (2023). *Wasserstraßen*. <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/mobilitaet-verkehr/wasser-und-haefen/wasserstrassen>
- Nederlandse Spoorwegen. (2023, 12. Januar). *Groene energie voor trein, bus en station | Duurzaamheid | Over NS | NS*. <https://www.ns.nl/over-ns/duurzaamheid/fossielvrij/groene-energie-voor-trein-bus-en-station.html>
- Nicita, A. & Razo, C. (2021). *China: The rise of a trade titan*. UNCTAD. <https://unctad.org/news/china-rise-trade-titan>
- Nuhn, H. & Hesse, M. (2006). *Verkehrsgeographie. Grundriss allgemeine Geographie: Bd. 2687*. Ferdinand Schöningh.
- OECD Stat (Hrsg.). (2018). *Detailed annual transport statistics: Rail infrastructure*. Organisation for economic co-operation and development. https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=ITF_CQ
- Polish Tourism Organisation (Hrsg.). (2023). *Straßen und Autobahnen*. <https://www.polen.travel/de/reisen/mit-dem-auto/strassen-und-autobahnen>
- Port of Hamburg (Hrsg.). (2023). *Die Fahrrinne ist bereit für tiefergehende Schiffe*. <https://www.hafen-hamburg.de/de/special/fahrinnenanpassung/>
- Port of Hamburg. (2023a, 10. Januar). *Europas größter Eisenbahnhafen*. <https://www.hafen-hamburg.de/de/transport/bahn/>
- Port of Hamburg. (2023b, 10. Januar). *Die Fahrrinne ist bereit für tiefergehende Schiffe*. <https://www.hafen-hamburg.de/de/special/fahrinnenanpassung/>
- Port of Hamburg. (2023c, 12. Januar). *Großcontainerschiffe*. <https://www.hafen-hamburg.de/de/statistiken/grosscontainerschiffe/>
- Port of Hamburg. (2023d, 12. Januar). *Schiffe*. https://www.hafen-hamburg.de/de/schiffe/?schiffstypen=89330&schiffe=169804&vessel_breadth=0&vessel_adweight=0&vessel_grt=0&vessel_length=0&vessel_teu=23480
- Port of Rotterdam (Hrsg.). (2023). *Container: Der Rotterdamer Hafen ist der größte Containerhafen Europas*. <https://www.portofrotterdam.com/de/logistik/ladung/container>
- Port of Rotterdam. (2023, 11. Januar). *Optimierung der Containerbinnenschiffahrtskette | Port of Rotterdam*. <https://www.portofrotterdam.com/de/logistik/verbindungen/modalitaeten/binnenschiffahrt/optimierung-der>
- Quaschnig, V. & Siegel, B. (2022). *Spezifische Kohlendioxidemissionen verschiedener Brennstoffe*. <https://www.volker-quaschnig.de/datserv/CO2-spez/index.php>
- Der Reiseführer (Hrsg.). (2018a). *Belarus: Mobilität vor Ort*. Columbus Travel Media Ltd. <https://www.derreisefuehrer.com/guides/europa/belarus/getting-around/>

- Der Reiseführer (Hrsg.). (2018b). *China (Volksrepublik): Mobilität vor Ort*. Columbus Travel Media Ltd.
<https://www.derreisefuehrer.com/guides/asien/china-volksrepublik/getting-around/>
- Der Reiseführer (Hrsg.). (2018c). *Kasachstan: Mobilität vor Ort*. Columbus Travel Media Ltd.
<https://www.derreisefuehrer.com/guides/asien/kasachstan/getting-around/>
- Der Reiseführer (Hrsg.). (2018d). *Russische Föderation: Mobilität vor Ort*. Columbus Travel Media Ltd.
<https://www.derreisefuehrer.com/guides/europa/russische-foderation/getting-around/>
- Renner, V. & Bialonski, W. (2004). *Technische und wirtschaftliche Konzepte für flussangepasste Binnenschiffe: Auftrag 2317 Bericht 1701 Schlussbericht*.
https://www.gdws.wsv.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Gutachten/flussangepasste_Binnenschiffe.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Routescanner (Hrsg.). (2022, 29. Dezember). *Routescanner – Make better container shipping decisions*.
https://www.routescanner.com/voyages?limit=3&from=CNSHA&fromType=locode&originsNearby=1&to=DEHAM&toType=locode&destinationsNearby=1&departure=2023-01-03&sort=emission_co2&modalities=sea%2Crail%2Ccharge%2Ctruck&hash=4fa4913d7056dc17889794a02dac28ef
- Routescanner (Hrsg.). (2023a, 5. Januar). *Port of Rotterdam - NLRTM to Duisburg - DEDUI*.
https://www.routescanner.com/voyages/detail?limit=6&from=NLRTM&fromType=locode&originsNearby=1&to=DEDUI&toType=locode&destinationsNearby=1&departure=2023-01-05&sort=emission_co2&modalities=sea%2Crail%2Ccharge%2Ctruck&hash=92057721328c22ad21b4476aae096a8f&voyageIndex=5
- Routescanner (Hrsg.). (2023b, 5. Januar). *Routescanner – Make better container shipping decisions: Rotterdam to Duisburg*.
https://www.routescanner.com/voyages?limit=3&from=NLRTM&fromType=locode&originsNearby=1&to=DEDUI&toType=locode&destinationsNearby=1&departure=2023-01-05&sort=emission_co2&modalities=sea%2Crail%2Ccharge%2Ctruck&hash=f33748b2d666ff47da056312eff9f027
- Rudolph, F., Koska, T. & Schneider, C. (2017). *Verkehrswende für Deutschland: Der Weg zu CO2-freier Mobilität bis 2035*.
https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6812/file/6812_Verkehrswende
- Schmidt, B. (16. Januar 2021). Verbrauch schwerer Lastwagen: Jedes Jahr ein Zehntel weniger. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*. <https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/motor/verbrauch-schwerer-lastwagen-jedes-jahr-ein-zehntel-weniger-17139650.html>
- Schmied, M [Martin] & Knörr, W. (2013). *Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258*.

- https://www.dslv.org/fileadmin/Redaktion/PDFs/07_Publikationen/Leitfaeden/DSLV-Leitfaden_Berechnung_von_THG-Emissionen_Stand_03-2013.pdf
- Schmied, M [Martin], Zimmer, W., Schmidt, K., Goerke, M. & Schlüter, O. (2007). *Nachhaltige Mobilität durch Innovationen im Güterverkehr (FKZ 906 96 533): Güterverkehrsmarkt und Umwelt*. <https://www.oeko.de/oekodoc/621/2007-161-de.pdf>
- Schmied, M [Matthias] & Mottschall, M. (2019). *Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV: Leitfaden zur Anwendung der europäischen Norm EN 16258*. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/energieverbrauch-treibhausgasemission-oepnv.pdf?__blob=publicationFile
- Ship Technology (Hrsg.). (2020). *Port of Shanghai: The Port of Shanghai is the busiest port in the world in terms of cargo tonnage and comprises a deep-sea port and a river port*. <https://www.ship-technology.com/projects/portofshanghai/>
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt (2007). Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-ts.pdf>
- Stajerits, A. (2018). *Inwieweit können sich die neu geschlossenen Handelsverträge zwischen China und Österreich (April 2018) auf die Intensivierung des (intermodalen) Schienengüterverkehrs im Hinblick auf die „Neue Seidenstraße“ (kontinentale Landwegverbindung, One Belt One Road) und des herkömmlichen maritimen Seeweges (insbesondere über Hafen Hamburg und Hafen Rotterdam) nach Europa, positiv auswirken und wo liegen die großen Chancen einer neuen Landwegverbindung*. Hochschule Mittweida, Mittweida. https://monami.hs-mittweida.de/frontdoor/deliver/index/docId/10668/file/Diplomarbeit_Vers11c_Stajerits.pdf
- statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2023a). *Empfang und Versand von Gütern (Seeverkehr): Deutschland, Jahre, Partnerländer, Umschlagsstärkste Seehäfen, Güterabteilungsaggregate*. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=previous&levelindex=0&step=0&titel=Tabelle+aufbau&levelid=1672665706719&acceptscookies=false#abreadcrumb>
- statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2023b). *Die Volksrepublik China ist erneut Deutschlands wichtigster Handelspartner*. statistisches Bundesamt.

- <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Aussenhandel/handelspartner-jahr.html;jsessionid=EF3083FFCF2DF535075692EC9C7F52E2.live731>
statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2021). *Zusammenfassende Übersichten für den Außenhandel - endgültige Ergebnisse: Fachserie 7 Reihe 1 - 2020*.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Aussenhandel/Publikationen/Downloads-Aussenhandel/zusammenfassende-uebersichten-jahr-endgueltig-2070100207004.pdf?__blob=publicationFile
- Sucky, E., Obermeier-Hartmann, C., Zitzmann, I., Dobhan, A., Klötzer, C., Ankenbrand, K., Linß, I., Eberhardt, L., Biethahn, N., Tubbesing, F., Gruner, L. M., Busch, V., Werner, J., Stodick, K., Deckert, C., Koch, G., Vogelsang, M., Höttger, R., Honekamp, I., . . . Ruther, F. (2019). *Mobility in a Globalised World 2018*. University of Bamberg Press. <https://doi.org/10.20378/irbo-54827>
- trans.info (Hrsg.). (2019). *Hamburg - die Drehscheibe für China-Verkehre in Europa*.
<https://trans.info/de/hamburg-die-drehscheibe-fuer-china-verkehre-in-europa-160456>
- Transport Informations Service (Hrsg.). (2023). *Binnenschiff: Transport Fachvorträge*.
<https://www.tis-gdv.de/tis/tagungen/svt/svt08/mcintyre/inhalt05-htm/>
- Übersichtskarte Deutschland: Flughäfen in Deutschland*. (2013). Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. Frankfurt am Main.
https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/themenkarten/wss-2013-04-1-flughaefen.pdf
- UK Government. (2022). *Greenhouse gas reporting: conversion factors 2022*.
<https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2022>
- UK Hydrographic Office (Hrsg.). (2016). *Dover Strait: Deep water route t - focused assessment DWR T/2016 V2*.
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/918548/2016_DWR_T_Deep_Water_Route_v2_Aug18.pdf
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2019a). *Ist Atomstrom wirklich CO2-frei?*
<https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/ist-atomstrom-wirklich-co2-frei>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2019b). *Mit welchem Kraftstoff fahren Seeschiffe?*
<https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/welchem-kraftstoff-fahren-seeschiffe>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2021a). *Übereinkommen von Paris*. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik/uebereinkommen-von-paris#ziele-des-ubereinkommens-von-paris-uvp>

- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2021b). *Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Güterverkehr*. <https://www.umweltbundesamt.de/bild/vergleich-der-durchschnittlichen-emissionen>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2022a). *Internationale und EU-Klimapolitik*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik#internationale-klimapolitik>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2022b). *Klimaschutz im Verkehr*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/klimaschutz-imhttps://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/klimaschutz-im-verkehr#ziele>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2022c). *Treibhausgasemissionen stiegen 2021 um 4,5 Prozent: Bundesklimaschutzministerium kündigt umfangreiches Sofortprogramm an* [Gemeinsame Pressemitteilung von Umweltbundesamt und Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz]. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-stiegen-2021-um-45-prozent>
- Umweltbundesamt. (2023, 8. Mai). *Indikator: Umweltfreundlicher Güterverkehr*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-umweltfreundlicher-gueterverkehr#welche-bedeutung-hat-der-indikator>
- Vallée, D., Engel, B. & Vogt, W. (Hrsg.). (2021). *Stadtverkehrsplanung* (3. Auflage). Springer Vieweg.
- VDI Zentrum Ressourceneffizienz (Hrsg.). (2022). *ESTEM - Einfache standardisierte Vorgehensweise zur Ermittlung eingesparter Treibhausgas-Emissionen von Projekten zur Materialeffizienz*. <https://www.ressource-deutschland.de/service/estem/>
- Virgil Interactive GmbH (Hrsg.). (2023, 6. Januar). *Landkarte Niederlande (Provinzen)*. <https://www.weltkarte.com/europa/holland/niederlande-provinzen.htm>
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. (2023). *Der Rhein*. https://www.gdws.wsv.bund.de/DE/wasserstrassen/01_bundeswasserstrassen/Rheinstromgebiet/Rhein.html
- Webfleet (Hrsg.). (2020). *So viel Kraftstoff verbrauchen Lkw*. https://www.webfleet.com/de_de/webfleet/blog/so-viel-kraftstoff-verbrauchen-lkw/
- Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages. (2007). *CO₂-Bilanzen verschiedener Energieträger im Vergleich: Zur Klimafreundlichkeit von fossilen Energien, Kernenergie und erneuerbaren Energien*. <https://www.bundestag.de/resource/blob/406432/70f77c4c170d9048d88dcc3071b7721c/wd-8-056-07-pdf-data.pdf>
- Woitschützke, C.-P. (2013). *Verkehrsgeografie* (5. Auflage). Bildungsverlag EINS.

- World Business Council for Sustainable Development; World Resources Institute. (2004). *The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard* (revised ed.). World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development.
- Zhang, M., Wiegmans, B. & Tavasszy, L. A. (2009). A comparative study on port hinterland intermodal container transport: Shanghai and Rotterdam. In *5th Advanced Forum on Transportation of China (AFTC 2009)* (S. 15–25). IET. <https://doi.org/10.1049/cp.2009.1580>

9 Anhang

1. Energie- und THG-Faktoren nach DIN EN 16258
2. Berechnungen für die Langstrecke Shanghai – Hamburg
 - a. Containerschiff
 - b. Flugzeug
 - c. Lkw
 - d. Eisenbahn
3. Berechnungen für die Kurzstrecke Rotterdam – Duisburg
 - a. Binnenschiff
 - b. Flugzeug
 - c. Lkw
 - d. Eisenbahn
4. Berechnung der Emissionsfaktoren für den Schienengüterverkehr

Energie- und THG-Faktoren nach DIN EN 16258

Kraftstoff	Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
HFO	Energiefaktor TtW	e_t	39,30	MJ/l
HFO	Energiefaktor WtW	e_w	42,70	MJ/l
HFO	THG-Emissionsfaktor TtW	g_t	3,05	Kg CO _{2e} /l
HFO	THG-Emissionsfaktor WtW	g_w	3,31	Kg CO _{2e} /l
Kerosin	Energiefaktor TtW	e_t	35,30	MJ/l
Kerosin	Energiefaktor WtW	e_w	42,00	MJ/l
Kerosin	THG-Emissionsfaktor TtW	g_t	2,54	Kg CO _{2e} /l
Kerosin	THG-Emissionsfaktor WtW	g_w	3,10	Kg CO _{2e} /l
Diesel	Energiefaktor TtW	e_t	35,90	MJ/l
Diesel	Energiefaktor WtW	e_w	42,70	MJ/l
Diesel	THG-Emissionsfaktor TtW	g_t	2,67	Kg CO _{2e} /l
Diesel	THG-Emissionsfaktor WtW	g_w	3,24	Kg CO _{2e} /l
Strom	Energiefaktor TtW	e_t	3,60	MJ/kWh
Strom	Energiefaktor WtW	e_w	11,25	MJ/kWh
Strom	THG-Emissionsfaktor TtW	g_t	0,0	Kg CO _{2e} /kWh
Strom	THG-Emissionsfaktor WtW	g_w	Abhängig vom Bahnstrommix	Kg CO _{2e} /kWh

Berechnungen für die Langstrecke Shanghai – Hamburg

Containerschiff

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Transportlänge	$l_{\text{Transport}}$	20.037	Km
Transportkapazität	$k_{\text{Transport}}$	200.000	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(\text{VOS})$	280	l/km
Energiefaktor TtW (HFO)	e_t	39,30	MJ/l
Energiefaktor WtW (HFO)	e_w	42,70	MJ/l
THG-Emissionsfaktor TtW (HFO)	g_t	3,05	Kg CO _{2e} /l
THG-Emissionsfaktor WtW (HFO)	g_w	3,31	Kg CO _{2e} /l

1. Gesamtkraftstoffverbrauch

$$F(VOS) = f(VOS) * l_{Transport} \quad [1]$$

$$F(VOS) = 280 \frac{l}{km} * 20.037 km \quad [2]$$

$$F(VOS) = 5.610.360 l \quad [3]$$

2. Transportleistung

$$T = k_{Transport} * l_{Transport} \quad [4]$$

$$T = 200.000 t * 20.037 km \quad [5]$$

$$T = 4.007.400.000 tkm \quad [6]$$

3. Energieverbrauch

Energieverbrauch Tank-to-Wheel

$$E_t (VOS) = F(VOS) * e_t \quad [7]$$

$$E_t (VOS) = 5.610.360 l * 39,30 \frac{MJ}{l} \quad [8]$$

$$E_t (VOS) = 220.487.148 MJ \quad [9]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel:

$$E_w (VOS) = F(VOS) * e_w \quad [10]$$

$$E_w (VOS) = 5.610.360 l * 42,70 \frac{MJ}{l} \quad [11]$$

$$E_w (VOS) = 239.562.372 MJ \quad [12]$$

4. Emissionshöhe

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel

$$G_t (VOS) = F(VOS) * g_t \quad [13]$$

$$G_t (VOS) = 5.610.360 l * 3,05 \frac{Kg CO_{2e}}{l} \quad [14]$$

$$G_t (VOS) = 17.111.598 Kg CO_{2e} \quad [15]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel

$$G_w (VOS) = F(VOS) * g_w \quad [16]$$

$$G_w (VOS) = 5.610.360 \text{ l} * 3,31 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{l}} \quad [17]$$

$$G_w (VOS) = 18.570.291 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [18]$$

5. Energieverbrauch pro Tonnenkilometer

Energieverbrauch Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$E_t(T) = \frac{E_t (VOS)}{T} \quad [19]$$

$$E_t(T) = \frac{220.487.148 \text{ MJ}}{4.007.400.000 \text{ tkm}} \quad [20]$$

$$E_t(T) = 0,055 \frac{\text{MJ}}{\text{tkm}} \quad [21]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer:

$$E_w(T) = \frac{E_w (VOS)}{T} \quad [22]$$

$$E_w(T) = \frac{239.562.372 \text{ MJ}}{4.007.400.000 \text{ tkm}} \quad [23]$$

$$E_w(T) = 0,06 \frac{\text{MJ}}{\text{tkm}} \quad [24]$$

6. Emissionshöhe pro Tonnenkilometer

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_t(T) = \frac{G_t (VOS)}{T} \quad [25]$$

$$G_t(T) = \frac{17.111.598 \text{ Kg CO}_{2e}}{4.007.400.000 \text{ tkm}} \quad [26]$$

$$G_t(T) = 0,004 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{tkm}} \quad [27]$$

$$G_t(T) = 4,27 \frac{\text{g CO}_{2e}}{\text{tkm}} \quad [28]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_w(T) = \frac{G_w(VOS)}{T} \quad [29]$$

$$G_w(T) = \frac{18.570.291 \text{ Kg } CO_{2e}}{4.007.400.000 \text{ tkm}} \quad [30]$$

$$G_w(T) = 0,005 \frac{\text{Kg } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [31]$$

$$G_w(T) = 4,63 \frac{\text{g } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [32]$$

Flugzeug

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Transportlänge	$l_{Transport}$	9.270	Km
Transportkapazität	$k_{Transport}$	103	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(VOS)$	20,40	l/km
Energiefaktor TtW (Kerosin)	e_t	35,30	MJ/l
Energiefaktor WtW (Kerosin)	e_w	42,00	MJ/l
THG-Emissionsfaktor TtW (Kerosin)	g_t	2,54	Kg CO _{2e} /l
THG-Emissionsfaktor WtW (Kerosin)	g_w	3,10	Kg CO _{2e} /l

1. Gesamtkraftstoffverbrauch

$$F(VOS) = f(VOS) * l_{Transport} \quad [33]$$

$$F(VOS) = 20,40 \frac{l}{km} * 9.270 km \quad [34]$$

$$F(VOS) = 189.108 l \quad [35]$$

2. Transportleistung

$$T = k_{Transport} * l_{Transport} \quad [36]$$

$$T = 103 t * 9.270 km \quad [37]$$

$$T = 954.810 tkm \quad [38]$$

3. Energieverbrauch

Energieverbrauch Tank-to-Wheel

$$E_t(VOS) = F(VOS) * e_t \quad [39]$$

$$E_t(VOS) = 189.108 l * 35,30 \frac{MJ}{l} \quad [40]$$

$$E_t(VOS) = 6.675.512,40 MJ \quad [41]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel:

$$E_w(VOS) = F(VOS) * e_w \quad [42]$$

$$E_w (VOS) = 189.108 \text{ l} * 42,00 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} \quad [43]$$

$$E_w (VOS) = 7.942.536 \text{ MJ} \quad [44]$$

4. Emissionshöhe

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel

$$G_t (VOS) = F(VOS) * g_t \quad [45]$$

$$G_t (VOS) = 189.108 \text{ l} * 2,54 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{l}} \quad [46]$$

$$G_t (VOS) = 480.334,32 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [47]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel

$$G_w (VOS) = F(VOS) * g_w \quad [48]$$

$$G_w (VOS) = 189.108 \text{ l} * 3,10 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{l}} \quad [49]$$

$$G_w (VOS) = 586.234,80 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [50]$$

5. Energieverbrauch pro Tonnenkilometer

Energieverbrauch Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$E_t(T) = \frac{E_t (VOS)}{T} \quad [51]$$

$$E_t(T) = \frac{6.675.512,40 \text{ MJ}}{954.810 \text{ tkm}} \quad [52]$$

$$E_t(T) = 6,99 \frac{\text{MJ}}{\text{tkm}} \quad [53]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer:

$$E_w(T) = \frac{E_w (VOS)}{T} \quad [54]$$

$$E_w(T) = \frac{7.942.536 \text{ MJ}}{954.810 \text{ tkm}} \quad [55]$$

$$E_w(T) = 8,32 \frac{\text{MJ}}{\text{tkm}} \quad [56]$$

6. Emissionshöhe pro Tonnenkilometer

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_t(T) = \frac{G_t(VOS)}{T} \quad [57]$$

$$G_t(T) = \frac{480.334,32 \text{ Kg } CO_{2e}}{954.810 \text{ tkm}} \quad [58]$$

$$G_t(T) = 0,503 \frac{\text{Kg } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [59]$$

$$G_t(T) = 503,07 \frac{\text{g } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [60]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_w(T) = \frac{G_w(VOS)}{T} \quad [61]$$

$$G_w(T) = \frac{586.234,80 \text{ Kg } CO_{2e}}{954.810 \text{ tkm}} \quad [62]$$

$$G_w(T) = 0,614 \frac{\text{Kg } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [63]$$

$$G_w(T) = 613,98 \frac{\text{g } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [64]$$

Lkw

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Transportlänge	$l_{Transport}$	10.605	Km
Transportkapazität	$k_{Transport}$	20	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(VOS)$	0,40	l/km
Energiefaktor TtW (Diesel)	e_t	35,90	MJ/l
Energiefaktor WtW (Diesel)	e_w	42,70	MJ/l
THG-Emissionsfaktor TtW (Diesel)	g_t	2,67	Kg CO _{2e} /l
THG-Emissionsfaktor WtW (Diesel)	g_w	3,24	Kg CO _{2e} /l

1. Gesamtkraftstoffverbrauch

$$F(VOS) = f(VOS) * l_{Transport} \quad [65]$$

$$F(VOS) = 0,4 \frac{l}{km} * 10.605 km \quad [66]$$

$$F(VOS) = 4.242 l \quad [67]$$

2. Transportleistung

$$T = k_{Transport} * l_{Transport} \quad [68]$$

$$T = 20 t * 10.605 km \quad [69]$$

$$T = 212.100 tkm \quad [70]$$

3. Energieverbrauch

Energieverbrauch Tank-to-Wheel

$$E_t(VOS) = F(VOS) * e_t \quad [71]$$

$$E_t(VOS) = 4.242 l * 35,90 \frac{MJ}{l} \quad [72]$$

$$E_t(VOS) = 152.287,80 MJ \quad [73]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel:

$$E_w(VOS) = F(VOS) * e_w \quad [74]$$

$$E_w (VOS) = 4.242 \text{ l} * 42,70 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} \quad [75]$$

$$E_w (VOS) = 181.133,40 \text{ MJ} \quad [76]$$

4. Emissionshöhe

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel

$$G_t (VOS) = F(VOS) * g_t \quad [77]$$

$$G_t (VOS) = 4.242 \text{ l} * 2,67 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{l}} \quad [78]$$

$$G_t (VOS) = 11.326,14 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [79]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel

$$G_w (VOS) = F(VOS) * g_w \quad [80]$$

$$G_w (VOS) = 4.242 \text{ l} * 3,24 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{l}} \quad [81]$$

$$G_w (VOS) = 13.744,08 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [82]$$

5. Energieverbrauch pro Tonnenkilometer

Energieverbrauch Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$E_t(T) = \frac{E_t (VOS)}{T} \quad [83]$$

$$E_t(T) = \frac{152.287,80 \text{ MJ}}{212.100 \text{ tkm}} \quad [84]$$

$$E_t(T) = 0,718 \frac{\text{MJ}}{\text{tkm}} \quad [85]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer:

$$E_w(T) = \frac{E_w (VOS)}{T} \quad [86]$$

$$E_w(T) = \frac{181.133,40 \text{ MJ}}{212.100 \text{ tkm}} \quad [87]$$

$$E_w(T) = 0,854 \frac{\text{MJ}}{\text{tkm}} \quad [88]$$

6. Emissionshöhe pro Tonnenkilometer

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_t(T) = \frac{G_t(VOS)}{T} \quad [89]$$

$$G_t(T) = \frac{11.326,14 \text{ Kg } CO_{2e}}{212.100 \text{ tkm}} \quad [90]$$

$$G_t(T) = 0,053 \frac{\text{Kg } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [91]$$

$$G_t(T) = 53,40 \frac{\text{g } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [92]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_w(T) = \frac{G_w(VOS)}{T} \quad [93]$$

$$G_w(T) = \frac{13.744,08 \text{ Kg } CO_{2e}}{212.100 \text{ tkm}} \quad [94]$$

$$G_w(T) = 0,065 \frac{\text{Kg } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [95]$$

$$G_w(T) = 64,80 \frac{\text{g } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [96]$$

Eisenbahn

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Transportlänge	$l_{Transport}$	10.721	Km
Transportkapazität	$k_{Transport}$	1.040	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(VOS)$	26,30	kWh/km
Energiefaktor TtW (Strom)	e_t	3,60	MJ/kWh
Energiefaktor WtW (Strom)	e_w	11,25	MJ/kWh
THG-Emissionsfaktor TtW (Strom)	g_t	0,0	Kg CO _{2e} /kWh
THG-Emissionsfaktor WtW (Strom)	g_w	0,60	Kg CO _{2e} /kWh

1. Gesamtkraftstoffverbrauch

$$F(VOS) = f(VOS) * l_{Transport} \quad [97]$$

$$F(VOS) = 26,30 \frac{kWh}{km} * 10.721 km \quad [98]$$

$$F(VOS) = 281.962,30 kWh \quad [99]$$

2. Transportleistung

$$T = k_{Transport} * l_{Transport} \quad [100]$$

$$T = 1.040 t * 10.721 km \quad [101]$$

$$T = 11.149.840 tkm \quad [102]$$

3. Energieverbrauch

Energieverbrauch Tank-to-Wheel

$$E_t(VOS) = F(VOS) * e_t \quad [103]$$

$$E_t(VOS) = 281.962,30 kWh * 3,60 \frac{MJ}{kWh} \quad [104]$$

$$E_t(VOS) = 1.015.064,28 MJ \quad [105]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel:

$$E_w(VOS) = F(VOS) * e_w \quad [106]$$

$$E_w (VOS) = 281.962,30 \text{ kWh} * 11,25 \frac{MJ}{kWh} \quad [107]$$

$$E_w (VOS) = 3.172.075,88 \text{ MJ} \quad [108]$$

4. Emissionshöhe

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel

$$G_t (VOS) = F(VOS) * g_t \quad [109]$$

$$G_t (VOS) = 281.962,30 \text{ kWh} * 0,0 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [110]$$

$$G_t (VOS) = 0,0 \text{ Kg } CO_{2e} \quad [111]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel

$$G_w (VOS) = F(VOS) * g_w \quad [112]$$

$$G_w (VOS) = 281.962,30 \text{ kWh} * 0,61 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [113]$$

$$G_w (VOS) = 170.223,02 \text{ Kg } CO_{2e} \quad [114]$$

5. Energieverbrauch pro Tonnenkilometer

Energieverbrauch Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$E_t(T) = \frac{E_t (VOS)}{T} \quad [115]$$

$$E_t(T) = \frac{1.015.064,28 \text{ MJ}}{11.149.840 \text{ tkm}} \quad [116]$$

$$E_t(T) = 0,091 \frac{MJ}{tkm} \quad [117]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer:

$$E_w(T) = \frac{E_w (VOS)}{T} \quad [118]$$

$$E_w(T) = \frac{3.172.075,88 \text{ MJ}}{11.149.840 \text{ tkm}} \quad [119]$$

$$E_w(T) = 0,284 \frac{MJ}{tkm} \quad [120]$$

6. Emissionshöhe pro Tonnenkilometer

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_t(T) = \frac{G_t(VOS)}{T} \quad [121]$$

$$G_t(T) = \frac{0,0 \text{ Kg } CO_{2e}}{11.149.840 \text{ tkm}} \quad [122]$$

$$G_t(T) = 0,0 \frac{\text{Kg } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [123]$$

$$G_t(T) = 0,0 \frac{\text{g } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [124]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_w(T) = \frac{G_w(VOS)}{T} \quad [125]$$

$$G_w(T) = \frac{170.223,02 \text{ Kg } CO_{2e}}{11.149.840 \text{ tkm}} \quad [126]$$

$$G_w(T) = 0,015 \frac{\text{Kg } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [127]$$

$$G_w(T) = 15,27 \frac{\text{g } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [128]$$

Berechnungen für die Kurzstrecke Rotterdam – Duisburg

Binnenschiff

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Transportlänge	$l_{\text{Transport}}$	218	Km
Transportkapazität	$k_{\text{Transport}}$	5.000	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(\text{VOS})$	24,90	l/km
Energiefaktor TtW (Diesel)	e_t	35,90	MJ/l
Energiefaktor WtW (Diesel)	e_w	42,70	MJ/l
THG-Emissionsfaktor TtW (Diesel)	g_t	2,67	Kg CO _{2e} /l
THG-Emissionsfaktor WtW (Diesel)	g_w	3,24	Kg CO _{2e} /l

1. Gesamtkraftstoffverbrauch

$$F(\text{VOS}) = f(\text{VOS}) * l_{\text{Transport}} \quad [129]$$

$$F(\text{VOS}) = 24,90 \frac{\text{l}}{\text{km}} * 218 \text{ km} \quad [130]$$

$$F(\text{VOS}) = 5.428,20 \text{ l} \quad [131]$$

2. Transportleistung

$$T = k_{\text{Transport}} * l_{\text{Transport}} \quad [132]$$

$$T = 5.000 \text{ t} * 218 \text{ km} \quad [133]$$

$$T = 1.090.000 \text{ tkm} \quad [134]$$

3. Energieverbrauch

Energieverbrauch Tank-to-Wheel

$$E_t(\text{VOS}) = F(\text{VOS}) * e_t \quad [135]$$

$$E_t(\text{VOS}) = 5.428,20 \text{ l} * 35,90 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} \quad [136]$$

$$E_t(\text{VOS}) = 194.872,38 \text{ MJ} \quad [137]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel:

$$E_w (VOS) = F(VOS) * e_w \quad [138]$$

$$E_w (VOS) = 5.428,20 \text{ l} * 42,70 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} \quad [139]$$

$$E_w (VOS) = 231.784,14 \text{ MJ} \quad [140]$$

4. Emissionshöhe

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel

$$G_t (VOS) = F(VOS) * g_t \quad [141]$$

$$G_t (VOS) = 5.428,20 \text{ l} * 2,67 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{l}} \quad [142]$$

$$G_t (VOS) = 14.493,29 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [143]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel

$$G_w (VOS) = F(VOS) * g_w \quad [144]$$

$$G_w (VOS) = 5.428,20 \text{ l} * 3,24 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{l}} \quad [145]$$

$$G_w (VOS) = 17.587,37 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [146]$$

5. Energieverbrauch pro Tonnenkilometer

Energieverbrauch Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$E_t(T) = \frac{E_t (VOS)}{T} \quad [147]$$

$$E_t(T) = \frac{194.872,38 \text{ MJ}}{1.090.000 \text{ tkm}} \quad [148]$$

$$E_t(T) = 0,179 \frac{\text{MJ}}{\text{tkm}} \quad [149]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer:

$$E_w(T) = \frac{E_w (VOS)}{T} \quad [150]$$

$$E_w(T) = \frac{231.784,14 \text{ MJ}}{1.090.000 \text{ tkm}} \quad [151]$$

$$E_w(T) = 0,213 \frac{\text{MJ}}{\text{tkm}} \quad [152]$$

6. Emissionshöhe pro Tonnenkilometer

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_t(T) = \frac{G_t(VOS)}{T} \quad [153]$$

$$G_t(T) = \frac{14.493,29 \text{ Kg } CO_{2e}}{1.090.000 \text{ tkm}} \quad [154]$$

$$G_t(T) = 0,013 \frac{\text{Kg } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [155]$$

$$G_t(T) = 13,30 \frac{\text{g } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [156]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_w(T) = \frac{G_w(VOS)}{T} \quad [157]$$

$$G_w(T) = \frac{17.587,37 \text{ Kg } CO_{2e}}{1.090.000 \text{ tkm}} \quad [158]$$

$$G_w(T) = 0,016 \frac{\text{Kg } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [159]$$

$$G_w(T) = 16,14 \frac{\text{g } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [160]$$

Luftfracht

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Teilstrecke Flugzeug (Hauptlauf)			
Transportlänge	$l_{\text{Transport}}$	178	Km
Transportkapazität	$k_{\text{Transport}}$	103	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(\text{VOS})$	20,4	l/km
Energiefaktor TtW (Kerosin)	e_t	35,30	MJ/l
Energiefaktor WtW (Kerosin)	e_w	42,00	MJ/l
THG-Emissionsfaktor TtW (Kerosin)	g_t	2,54	Kg CO _{2e} /l
THG-Emissionsfaktor WtW (Kerosin)	g_w	3,10	Kg CO _{2e} /l
Teilstrecke Lkw (Vor- und Nachlauf)			
Transportlänge	$l_{\text{Transport}}$	392 ²²	Km
Transportkapazität	$k_{\text{Transport}}$	27	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(\text{VOS})$	0,40	l/km
Energiefaktor TtW (Diesel)	e_t	35,90	MJ/l
Energiefaktor WtW (Diesel)	e_w	42,70	MJ/l
THG-Emissionsfaktor TtW (Diesel)	g_t	2,67	Kg CO _{2e} /l
THG-Emissionsfaktor WtW (Diesel)	g_w	3,24	Kg CO _{2e} /l

1. GesamtkraftstoffverbrauchFlugzeug

$$F(\text{VOS})_{\text{Flug}} = f(\text{VOS}) * l_{\text{Transport}} \quad [161]$$

$$F(\text{VOS})_{\text{Flug}} = 20,4 \frac{\text{l}}{\text{km}} * 178 \text{ km} \quad [162]$$

$$F(\text{VOS})_{\text{Flug}} = 3.631,20 \text{ l} \quad [163]$$

Lkw

$$F(\text{VOS})_{\text{Lkw}} = f(\text{VOS}) * l_{\text{Transport}} \quad [164]$$

$$F(\text{VOS})_{\text{Lkw}} = 0,40 \frac{\text{l}}{\text{km}} * 392 \text{ km} \quad [165]$$

²² Die tatsächliche Strecke von 98 km muss mit dem Faktor 4 multipliziert werden, da es vier 40-t Lkw benötigt, um die Ladung des Frachtflugzeugs transportieren zu können

$$F(VOS)_{Lkw} = 156,80 \text{ l} \quad [166]$$

2. Transportleistung

Flugzeug

$$T_{Flug} = k_{Transport} * l_{Transport} \quad [167]$$

$$T_{Flug} = 103 \text{ t} * 178 \text{ km} \quad [168]$$

$$T_{Flug} = 18.334 \text{ tkm} \quad [169]$$

Lkw

$$T_{Lkw} = k_{Transport} * l_{Transport} \quad [170]$$

$$T_{Lkw} = 27 \text{ t} * 392 \text{ km} \quad [171]$$

$$T_{Lkw} = 10.584 \text{ tkm} \quad [172]$$

Gesamt

$$T_{Ges} = T_{Flug} + T_{Lkw} \quad [173]$$

$$T_{Ges} = 18.334 \text{ tkm} + 10.584 \text{ tkm} \quad [174]$$

$$T_{Ges} = 28.918 \text{ tkm} \quad [175]$$

3. Energieverbrauch

Energieverbrauch Tank-to-Wheel

Flugzeug

$$E_t (VOS)_{Flug} = F(VOS)_{Flug} * e_t \quad [176]$$

$$E_t (VOS)_{Flug} = 3.631,20 \text{ l} * 35,30 \frac{MJ}{l} \quad [177]$$

$$E_t (VOS)_{Flug} = 128.181,36 \text{ MJ} \quad [178]$$

Lkw

$$E_t (VOS)_{Lkw} = F(VOS)_{Lkw} * e_t \quad [179]$$

$$E_t (VOS)_{Lkw} = 156,80 \text{ l} * 35,90 \frac{MJ}{l} \quad [180]$$

$$E_t (VOS)_{Lkw} = 5.629,12 \text{ MJ} \quad [181]$$

Gesamt

$$E_t (VOS)_{Ges} = E_t (VOS)_{Flug} + E_t (VOS)_{Lkw} \quad [182]$$

$$E_t (VOS)_{Ges} = 128.181,36 \text{ MJ} + 5.629,12 \text{ MJ} \quad [183]$$

$$E_t (VOS)_{Ges} = 133.810,48 \text{ MJ} \quad [184]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel:

Flugzeug

$$E_w (VOS)_{Flug} = F(VOS)_{Flug} * e_w \quad [185]$$

$$E_w (VOS)_{Flug} = 3.631,20 \text{ l} * 42,00 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} \quad [186]$$

$$E_w (VOS)_{Flug} = 152.510,40 \text{ MJ} \quad [187]$$

Lkw

$$E_w (VOS)_{Lkw} = F(VOS)_{Lkw} * e_w \quad [188]$$

$$E_w (VOS)_{Lkw} = 156,80 * 42,70 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} \quad [189]$$

$$E_w (VOS)_{Lkw} = 6.695,36 \text{ MJ} \quad [190]$$

Gesamt

$$E_w (VOS)_{Ges} = E_w (VOS)_{Flug} + E_w (VOS)_{Lkw} \quad [191]$$

$$E_w (VOS)_{Ges} = 152.510,40 \text{ MJ} + 6.695,36 \text{ MJ} \quad [192]$$

$$E_w (VOS)_{Ges} = 159.205,76 \text{ MJ} \quad [193]$$

4. Emissionshöhe

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel

Flugzeug

$$G_t (VOS)_{Flug} = F(VOS)_{Flug} * g_t \quad [194]$$

$$G_t (VOS)_{Flug} = 3.631,20 * 2,54 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{l}} \quad [195]$$

$$G_t (VOS)_{Flug} = 9.223,25 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [196]$$

Lkw

$$G_t (VOS)_{Lkw} = F(VOS)_{Lkw} * g_t \quad [197]$$

$$G_t (VOS)_{Lkw} = 156,80 \text{ l} * 2,67 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{l}} \quad [198]$$

$$G_t (VOS)_{Lkw} = 418,66 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [199]$$

Gesamt

$$G_t (VOS)_{Ges} = G_t (VOS)_{Flug} + G_t (VOS)_{Lkw} \quad [200]$$

$$G_t (VOS)_{Ges} = 9.223,25 \text{ Kg CO}_{2e} + 418,66 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [201]$$

$$G_t (VOS)_{Ges} = 9.641,90 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [202]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel

Flugzeug

$$G_w (VOS)_{Flug} = F(VOS)_{Flug} * g_w \quad [203]$$

$$G_w (VOS)_{Flug} = 3.631,20 \text{ l} * 3,10 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{l}} \quad [204]$$

$$G_w (VOS)_{Flug} = 11.256,72 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [205]$$

Lkw

$$G_w (VOS)_{Lkw} = F(VOS)_{Lkw} * g_w \quad [206]$$

$$G_w (VOS)_{Lkw} = 156,80 \text{ l} * 3,24 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{l}} \quad [207]$$

$$G_w (VOS)_{Lkw} = 508,03 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [208]$$

Gesamt

$$G_w (VOS)_{Ges} = G_w (VOS)_{Flug} + G_w (VOS)_{Lkw} \quad [209]$$

$$G_w (VOS)_{Ges} = 11.256,72 \text{ Kg CO}_{2e} + 508,03 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [210]$$

$$G_w (VOS)_{Ges} = 11.764,75 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [211]$$

5. Energieverbrauch pro Tonnenkilometer

Energieverbrauch Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$E_t(T) = \frac{E_t (VOS)_{Ges}}{T_{Ges}} \quad [212]$$

$$E_t(T) = \frac{133.810,48 \text{ MJ}}{28.918 \text{ tkm}} \quad [213]$$

$$E_t(T) = 4,627 \frac{\text{MJ}}{\text{tkm}} \quad [214]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer:

$$E_w(T) = \frac{E_w (VOS)_{Ges}}{T_{Ges}} \quad [215]$$

$$E_w(T) = \frac{159.205,76 \text{ MJ}}{28.918 \text{ tkm}} \quad [216]$$

$$E_w(T) = 5,505 \frac{\text{MJ}}{\text{tkm}} \quad [217]$$

6. Emissionshöhe pro Tonnenkilometer

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_t(T) = \frac{G_t (VOS)_{Ges}}{T_{Ges}} \quad [218]$$

$$G_t(T) = \frac{9.641,90 \text{ Kg CO}_{2e}}{28.918 \text{ tkm}} \quad [219]$$

$$G_t(T) = 0,333 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{tkm}} \quad [220]$$

$$G_t(T) = 333,42 \frac{\text{g CO}_{2e}}{\text{tkm}} \quad [221]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_w(T) = \frac{G_w (VOS)_{Ges}}{T_{Ges}} \quad [222]$$

$$G_w(T) = \frac{11.764,75 \text{ Kg CO}_{2e}}{28.918 \text{ tkm}} \quad [223]$$

$$G_w(T) = 0,407 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{tkm}} \quad [224]$$

$$G_w(T) = 406,83 \frac{\text{g CO}_{2e}}{\text{tkm}} \quad [225]$$

Lkw

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Transportlänge	$l_{Transport}$	220	Km
Transportkapazität	$k_{Transport}$	20	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(VOS)$	0,40	l/km
Energiefaktor TtW (Diesel)	e_t	35,90	MJ/l
Energiefaktor WtW (Diesel)	e_w	42,70	MJ/l
THG-Emissionsfaktor TtW (Diesel)	g_t	2,67	Kg CO _{2e} /l
THG-Emissionsfaktor WtW (Diesel)	g_w	3,24	Kg CO _{2e} /l

1. Gesamtkraftstoffverbrauch

$$F(VOS) = f(VOS) * l_{Transport} \quad [226]$$

$$F(VOS) = 0,40 \frac{l}{km} * 220 km \quad [227]$$

$$F(VOS) = 88 l \quad [228]$$

2. Transportleistung

$$T = k_{Transport} * l_{Transport} \quad [229]$$

$$T = 20 t * 220 km \quad [230]$$

$$T = 4.400 tkm \quad [231]$$

3. Energieverbrauch

Energieverbrauch Tank-to-Wheel

$$E_t (VOS) = F(VOS) * e_t \quad [232]$$

$$E_t (VOS) = 88 l * 35,90 \frac{MJ}{l} \quad [233]$$

$$E_t (VOS) = 3.159,20 MJ \quad [234]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel:

$$E_w (VOS) = F(VOS) * e_w \quad [235]$$

$$E_w (VOS) = 88 \text{ l} * 42,70 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} \quad [236]$$

$$E_w (VOS) = 3.757,60 \text{ MJ} \quad [237]$$

4. Emissionshöhe

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel

$$G_t (VOS) = F(VOS) * g_t \quad [238]$$

$$G_t (VOS) = 88 \text{ l} * 2,67 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{l}} \quad [239]$$

$$G_t (VOS) = 234,96 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [240]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel

$$G_w (VOS) = F(VOS) * g_w \quad [241]$$

$$G_w (VOS) = 88 \text{ l} * 3,24 \frac{\text{Kg CO}_{2e}}{\text{l}} \quad [242]$$

$$G_w (VOS) = 285,12 \text{ Kg CO}_{2e} \quad [243]$$

5. Energieverbrauch pro Tonnenkilometer

Energieverbrauch Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$E_t(T) = \frac{E_t (VOS)}{T} \quad [244]$$

$$E_t(T) = \frac{3.159,20 \text{ MJ}}{4.400 \text{ tkm}} \quad [245]$$

$$E_t(T) = 0,718 \frac{\text{MJ}}{\text{tkm}} \quad [246]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer:

$$E_w(T) = \frac{E_w (VOS)}{T} \quad [247]$$

$$E_w(T) = \frac{3.757,60 \text{ MJ}}{4.400 \text{ tkm}} \quad [248]$$

$$E_w(T) = 0,854 \frac{\text{MJ}}{\text{tkm}} \quad [249]$$

6. Emissionshöhe pro Tonnenkilometer

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_t(T) = \frac{G_t(VOS)}{T} \quad [250]$$

$$G_t(T) = \frac{234,96 \text{ Kg } CO_{2e}}{4.400 \text{ tkm}} \quad [251]$$

$$G_t(T) = 0,053 \frac{\text{Kg } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [252]$$

$$G_t(T) = 53,40 \frac{\text{g } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [253]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_w(T) = \frac{G_w(VOS)}{T} \quad [254]$$

$$G_w(T) = \frac{285,12 \text{ Kg } CO_{2e}}{4.400 \text{ tkm}} \quad [255]$$

$$G_w(T) = 0,065 \frac{\text{Kg } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [256]$$

$$G_w(T) = 64,80 \frac{\text{g } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [257]$$

Eisenbahn

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
Transportlänge	$l_{Transport}$	206	Km
Transportkapazität	$k_{Transport}$	1.040	t
Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$f(VOS)$	26,30	kWh/km
Energiefaktor TtW (Strom)	e_t	3,60	MJ/kWh
Energiefaktor WtW (Strom)	e_w	11,25	MJ/kWh
THG-Emissionsfaktor TtW (Strom)	g_t	0,0	Kg CO _{2e} /kWh
THG-Emissionsfaktor WtW (Strom)	g_w	0,13	Kg CO _{2e} /kWh

1. Gesamtkraftstoffverbrauch

$$F(VOS) = f(VOS) * l_{Transport} \quad [258]$$

$$F(VOS) = 26,30 \frac{kWh}{km} * 206 km \quad [259]$$

$$F(VOS) = 5.417,80 kWh \quad [260]$$

2. Transportleistung

$$T = k_{Transport} * l_{Transport} \quad [261]$$

$$T = 1.040 t * 206 km \quad [262]$$

$$T = 214.240 tkm \quad [263]$$

3. Energieverbrauch

Energieverbrauch Tank-to-Wheel

$$E_t(VOS) = F(VOS) * e_t \quad [264]$$

$$E_t(VOS) = 5.417,80 kWh * 3,60 \frac{MJ}{kWh} \quad [265]$$

$$E_t(VOS) = 19.504,08 MJ \quad [266]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel:

$$E_w(VOS) = F(VOS) * e_w \quad [267]$$

$$E_w (VOS) = 5.417,80 \text{ kWh} * 11,25 \frac{MJ}{kWh} \quad [268]$$

$$E_w (VOS) = 60.950,25 \text{ MJ} \quad [269]$$

4. Emissionshöhe

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel

$$G_t (VOS) = F(VOS) * g_t \quad [270]$$

$$G_t (VOS) = 5.417,80 \text{ kWh} * 0,0 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [271]$$

$$G_t (VOS) = 0,0 \text{ Kg } CO_{2e} \quad [272]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel

$$G_w (VOS) = F(VOS) * g_w \quad [273]$$

$$G_w (VOS) = 5.417,80 \text{ kWh} * 0,13 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [274]$$

$$G_w (VOS) = 704,31 \text{ Kg } CO_{2e} \quad [275]$$

5. Energieverbrauch pro Tonnenkilometer

Energieverbrauch Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$E_t(T) = \frac{E_t (VOS)}{T} \quad [276]$$

$$E_t(T) = \frac{19.504,08 \text{ MJ}}{214.240 \text{ tkm}} \quad [277]$$

$$E_t(T) = 0,091 \frac{MJ}{tkm} \quad [278]$$

Energieverbrauch Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer:

$$E_w(T) = \frac{E_w (VOS)}{T} \quad [279]$$

$$E_w(T) = \frac{60.950,25 \text{ MJ}}{214.240 \text{ tkm}} \quad [280]$$

$$E_w(T) = 0,284 \frac{MJ}{tkm} \quad [281]$$

6. Emissionshöhe pro Tonnenkilometer

Treibhausgasemissionen Tank-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_t(T) = \frac{G_t(VOS)}{T} \quad [282]$$

$$G_t(T) = \frac{0,0 \text{ Kg } CO_{2e}}{214.240 \text{ tkm}} \quad [283]$$

$$G_t(T) = 0,0 \frac{\text{Kg } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [284]$$

$$G_t(T) = 0,0 \frac{\text{g } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [285]$$

Treibhausgasemissionen Well-to-Wheel pro Tonnenkilometer

$$G_w(T) = \frac{G_w(VOS)}{T} \quad [286]$$

$$G_w(T) = \frac{704,31 \text{ Kg } CO_{2e}}{214.240 \text{ tkm}} \quad [287]$$

$$G_w(T) = 0,003 \frac{\text{Kg } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [288]$$

$$G_w(T) = 3,29 \frac{\text{g } CO_{2e}}{\text{tkm}} \quad [289]$$

Berechnung der Emissionsfaktoren für den Schienengüterverkehr

1. Daten für den Elektrifizierungsgrad des Schienenverkehrs pro Land
2. Daten für den (Bahn-)Strommix der einzelnen Länder
3. CO_{2e}-Faktoren für verschiedene Energieträger
4. Ermittlung der CO_{2e}-Faktoren für den Strommix der einzelnen Länder
5. Streckenverteilung auf die einzelnen Länder
6. Ermittlung eines CO_{2e}-Faktors je Strecke mit der Streckenverteilung

1. Daten für den Elektrifizierungsgrad des Schienenverkehrs pro Land

Strecke	Land	Elektrifizierungsgrad Schiene	Einheit
SHA-HAM	China	73,3	%
SHA-HAM	Kasachstan	26,4	%
SHA-HAM	Russland	50,9	%
SHA-HAM	Belarus	22,5	%
SHA-HAM	Polen	67,5	%
SHA-HAM; ROT-DUI	Deutschland	89,3	%
ROT-DUI	Niederlande	75,6	%

2. Daten für den (Bahn-)Strommix der einzelnen Länder

Strecke	Land	Fossile Energieträger	Atomenergie	Erneuerbare Energieträger	Einheit
SHA-HAM	China	73	3	24	%
SHA-HAM	Kasachstan	88	0	12	%
SHA-HAM	Russland	66	18	16	%
SHA-HAM	Belarus	45	52	3	%
SHA-HAM	Polen	81	0	19	%
SHA-HAM; ROT-DUI	Deutschland	27	11	62	%
ROT-DUI	Niederlande	0	0	100	%

3. CO_{2e}-Faktoren für verschiedene Energieträger

Energieträger	CO _{2e} -Faktor	Einheit
Strom aus erneuerbaren Energieträgern (Durchschnitt)	0,051	Kg CO _{2e} /kWh
Atomenergie	0,025	Kg CO _{2e} /kWh
Strom aus fossilen Energieträgern (Durchschnitt)	0,826	Kg CO _{2e} /kWh

4. Ermittlung der CO₂-Faktoren für den Strommix der einzelnen Länder

$$g_{w, Land} = (x_{fossil} * g_{w, fossil}) + (x_{nuklear} * g_{w, nuklear}) + (x_{ee} * g_{w, ee}) \quad [290]$$

Mit:

- $g_{w, Land}$ = Allgemeiner CO_{2e}-Faktor für den Bahnstrommix eines Landes [Kg CO_{2e}/kWh]
- $g_{w, fossil}$ = CO_{2e}-Faktor für Strom aus fossilen Energieträgern [Kg CO_{2e}/kWh]
- $g_{w, nuklear}$ = CO_{2e}-Faktor für Strom aus Nuklearenergie [Kg CO_{2e}/kWh]
- $g_{w, ee}$ = CO_{2e}-Faktor für Strom aus erneuerbaren Energieträgern [Kg CO_{2e}/kWh]
- x_{fossil} = Anteil an fossilen Energieträgern am Bahnstrommix
- $x_{nuklear}$ = Anteil an Nuklearenergie am Bahnstrommix
- x_{ee} = Anteil an erneuerbaren Energieträgern am Bahnstrommix

China

$$g_{w, CHN} = (x_{fossil} * g_{w, fossil}) + (x_{nuklear} * g_{w, nuklear}) + (x_{ee} * g_{w, ee}) \quad [291]$$

$$g_{w, CHN} = (0,73 * 0,826 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,03 * 0,025 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,24 * 0,051 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) \quad [292]$$

$$g_{w, CHN} = 0,62 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [293]$$

Kasachstan

$$g_{w, KAZ} = (x_{fossil} * g_{w, fossil}) + (x_{nuklear} * g_{w, nuklear}) + (x_{ee} * g_{w, ee}) \quad [294]$$

$$g_{w, KAZ} = (0,88 * 0,826 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,0 * 0,025 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,12 * 0,051 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) \quad [295]$$

$$g_{w, KAZ} = 0,73 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [296]$$

Russland

$$g_{w,RUS} = (x_{fossil} * g_{w,fossil}) + (x_{nuklear} * g_{w,nuklear}) + (x_{ee} * g_{w,ee}) \quad [297]$$

$$g_{w,RUS} = (0,66 * 0,826 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,18 * 0,025 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,16 * 0,051 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) \quad [298]$$

$$g_{w,RUS} = 0,55 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [299]$$

Belarus

$$g_{w,BLR} = (x_{fossil} * g_{w,fossil}) + (x_{nuklear} * g_{w,nuklear}) + (x_{ee} * g_{w,ee}) \quad [300]$$

$$g_{w,BLR} = (0,45 * 0,826 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,52 * 0,025 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,03 * 0,051 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) \quad [301]$$

$$g_{w,BLR} = 0,38 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [302]$$

Polen

$$g_{w,POL} = (x_{fossil} * g_{w,fossil}) + (x_{nuklear} * g_{w,nuklear}) + (x_{ee} * g_{w,ee}) \quad [303]$$

$$g_{w,POL} = (0,81 * 0,826 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,0 * 0,025 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,19 * 0,051 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) \quad [304]$$

$$g_{w,POL} = 0,68 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [305]$$

Deutschland

$$g_{w,DEU} = (x_{fossil} * g_{w,fossil}) + (x_{nuklear} * g_{w,nuklear}) + (x_{ee} * g_{w,ee}) \quad [306]$$

$$g_{w,DEU} = (0,27 * 0,826 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,11 * 0,025 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,62 * 0,051 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) \quad [307]$$

$$g_{w,DEU} = 0,26 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [308]$$

Niederlande

$$g_{w,NLD} = (x_{fossil} * g_{w,fossil}) + (x_{nuklear} * g_{w,nuklear}) + (x_{ee} * g_{w,ee}) \quad [309]$$

$$g_{w,NLD} = (0,0 * 0,826 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,0 * 0,025 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (1,0 * 0,051 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) \quad [310]$$

$$g_{w,NLD} = 0,05 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [311]$$

Strecke	Land	CO _{2e} -Faktor	Einheit
SHA-HAM	China	0,62	Kg CO _{2e} /kWh
SHA-HAM	Kasachstan	0,73	Kg CO _{2e} /kWh
SHA-HAM	Russland	0,55	Kg CO _{2e} /kWh
SHA-HAM	Belarus	0,38	Kg CO _{2e} /kWh
SHA-HAM	Polen	0,68	Kg CO _{2e} /kWh
SHA-HAM; ROT-DUI	Deutschland	0,26	Kg CO _{2e} /kWh
ROT-DUI	Niederlande	0,05	Kg CO _{2e} /kWh

5. Streckenverteilung auf die einzelnen Länder

Strecke	Gesamtlänge	Land	Teilstreckenlänge	Einheit
SHA-HAM	10.721	China	4.239,2	km
SHA-HAM	10.721	Kasachstan	2.280,3	km
SHA-HAM	10.721	Russland	2.542,9	km
SHA-HAM	10.721	Belarus	609,7	km
SHA-HAM	10.721	Polen	667,5	km
SHA-HAM	10.721	Deutschland	381,4	km
ROT-DUI	206	Deutschland	83	km
ROT-DUI	206	Niederlande	123	km

Strecke	Land	Streckenanteil	Einheit
SHA-HAM	China	40	%
SHA-HAM	Kasachstan	21	%
SHA-HAM	Russland	24	%
SHA-HAM	Belarus	6	%
SHA-HAM	Polen	6	%
SHA-HAM	Deutschland	4	%
ROT-DUI	Deutschland	40	%
ROT-DUI	Niederlande	60	%

6. Ermittlung eines CO₂-Faktors je Strecke mit der Streckenverteilung

$$g_{w,Strecke} = (x_{Start} * g_{w,Start}) + (x_{Land i} * g_{w,Land i}) + (...) + (x_{Ziel} * g_{w,Ziel}) \quad [312]$$

Mit:

$$g_{w, Strecke} = \text{Allgemeiner CO}_{2e}\text{-Faktor der gesamten Bahnstrecke [Kg CO}_{2e}\text{/kWh]}$$

$$g_{w, Start} = \text{Allgemeiner CO}_{2e}\text{-Faktor für den Bahnstrommix des Startlandes [Kg CO}_{2e}\text{/kWh]}$$

$$g_{w, Land i} = \text{Allgemeiner CO}_{2e}\text{-Faktor für den Bahnstrommix eines Durchfahrtslandes i [Kg CO}_{2e}\text{/kWh]}$$

$$g_{w, Ziel} = \text{Allgemeiner CO}_{2e}\text{-Faktor für den Bahnstrommix des Ziellandes [Kg CO}_{2e}\text{/kWh]}$$

$$x_{Start} = \text{Streckenanteil des Startlandes an gesamter Streckenlänge}$$

$$x_{Land i} = \text{Streckenanteil eines Durchfahrtslandes i an gesamter Streckenlänge}$$

$$x_{Ziel} = \text{Streckenanteil des Ziellandes an gesamter Streckenlänge}$$

Langstrecke Shanghai – Hamburg

$$g_{w,SHA-HAM} = (x_{CHN} * g_{w,CHN}) + (x_{KAZ} * g_{w,KAZ}) + (x_{RUS} * g_{w,RUS}) + (x_{BLR} * g_{w,BLR}) + (x_{POL} * g_{w,POL}) + (x_{DEU} * g_{w,DEU}) \quad [313]$$

$$g_{w,SHA-HAM} = (0,4 * 0,62 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,21 * 0,73 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,24 * 0,55 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,06 * 0,38 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,06 * 0,68 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,04 * 0,26 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) \quad [314]$$

$$g_{w,SHA-HAM} = 0,60 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [315]$$

Kurzstrecke Rotterdam – Duisburg

$$g_{w,ROT-DUI} = (x_{NLD} * g_{w,NLD}) + (x_{DEU} * g_{w,DEU}) \quad [316]$$

$$g_{w,ROT-DUI} = (0,6 * 0,05 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) + (0,4 * 0,26 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh}) \quad [317]$$

$$g_{w,ROT-DUI} = 0,13 \frac{Kg CO_{2e}}{kWh} \quad [318]$$

Strecke	CO _{2e} -Faktor	Einheit
SHA-HAM	0,60	Kg CO _{2e} /kWh
ROT-DUI	0,13	Kg CO _{2e} /kWh

10 Literaturverzeichnis

Umweltbundesamt (Hg.) (2022): Klimaschutz im Verkehr. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/klimaschutz-imhttps://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/klimaschutz-im-verkehr#ziele>, zuletzt aktualisiert am 20.05.2022, zuletzt geprüft am 08.11.2022.