



Lehrstuhl für Industrielogistik

Masterarbeit

Modellierung von Treibhausgasemissionen
in Intermodalterminals



Sandra Pachteu, BSc

Oktober 2023



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 25.10.2023

Sandra Pachteu

Unterschrift Verfasser/in
Sandra Pachteu

Kurzfassung

Nachhaltigkeit in der Transportlogistik gewinnt an immer höherer Wichtigkeit. Entlang der gesamten Transportkette spielt dies mittlerweile eine große Rolle. Der Transport von Waren über die Schiene zählt zu den umweltfreundlichsten Methoden. Jedoch ist es weiterhin notwendig im Vor- und Nachlauf einen Verkehrsträger auf der Straße einzusetzen, um die Waren von der Schiene zum Kunden und umgekehrt zu bringen. In diesem Sinne vereint der Kombinierte Verkehr sowohl die Vorteile der Schiene als auch die hohe Flexibilität des Transportes auf der Straße. Für die Berechnung der Emissionen, welche bei dem Transport von Gütern anfallen, sind bereits eine Vielzahl an Modellen bekannt. Jedoch werden für die, an den Umschlagterminals entstandenen CO₂-Werte, in Hinblick auf die Gesamtberechnung nur Durchschnittswerte eingesetzt. Dies sollte durch geeignete einfach zu handhabende Tools geändert werden. Dadurch kann die Erstellung einer CO₂-Bilanz an Intermodalterminals erleichtert werden und detaillierte Ergebnisse für die Betreiber liefern. Wodurch in einem weiteren Schritt Verbesserungsmöglichkeiten abgeleitet werden können.

Abstract

Sustainability in transport logistics is becoming increasingly important. This plays nowadays a major role along the entire transport chain. Transporting goods by rail is one of the most environmentally friendly methods. However, it is still necessary to use a type of transportation on the road for the pre- and post carriage in order to bring the goods from the rail to the customer and vice versa. In this sense, combined transport combines both the advantages of rail and the high flexibility of road transport. A large number of models are already known for calculating the emissions that occur during the transport of goods. However, only average values are used for the CO₂ values generated at the intermodal terminals with regard to the overall calculation. This thesis aims to change this issue by using suitable easy-to-use tools. This can make it easier to draw up a CO₂ balance at intermodal terminals and provide detailed results for the operators. Through which, in a further step, possibilities for improvement can be derived.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
Tabellen- und Abbildungsverzeichnis.....	IX
1 Einleitung	11
1.1 Motivation und Problemstellung.....	11
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen	12
1.3 Methodik.....	12
1.4 Aufbau der Arbeit.....	13
2 Theoretische Grundlagen der Emissionsbewertung in Logistikzentren	15
2.1 Grundlagen Logistikzentren	15
2.1.1 Arten von Logistikzentren	16
2.2 Nachhaltigkeit in der Transportlogistik.....	17
2.2.1 Emissionen im kombinierten Verkehr	18
2.2.2 Treibhausgase	19
2.2.3 Bilanzierung der Treibhausgasemissionen.....	21
2.3 CO ₂ -Emissionen in Logistikzentren	22
2.3.1 Distributionszentrum	22
2.3.2 Umschlagterminal.....	23
2.4 Geltende Normen zur Berechnung von CO ₂ -Emissionen	25
2.4.1 DIN EN 16258	25
2.4.2 EN ISO 14083.....	25
2.4.3 GLEC-Framework	26

2.4.4	Fraunhofer IML: Anleitung zur Bilanzierung von Treibhausgasen in Logistikzentren	26
2.4.5	Greenhouse Gas Protocol	27
2.4.6	Übersicht aller geltenden Normen und Standards	28
3	Grundlagen zu Intermodalterminals als Schnittstelle im kombinierten Verkehr.....	30
3.1	Definition.....	30
3.2	Ladeeinheiten	32
3.3	Transportmittel.....	34
3.4	K-V-Terminals	34
3.4.1	Umschlaggeräte	36
3.5	Herausforderungen im Kombinierten Verkehr	40
3.6	Vorteile des Kombinierten Verkehrs.....	41
3.7	Emissionen in Intermodalterminals.....	41
4	Systematische Literaturrecherche zur Berechnung und Modellierung von Emissionen in Intermodalterminals.....	43
4.1	Methodik.....	43
4.2	Deskriptive Analyse	45
4.3	Inhaltsanalyse und Ergebnisse	48
5	Entwicklung eines Berechnungsmodells	52
5.1	Vorbereitung	52
5.2	Prozess der Entwicklung in Microsoft Excel.....	52
5.3	Berechnungslogik nach Fraunhofer	53
5.4	Adaptionen der Fraunhofer Methodik.....	56
5.5	Gestaltung der Ergebnisse	59
5.6	Abgrenzung zu anderen Tools zur Emissionsberechnung.....	59
5.6.1	EcoTransIT World.....	59
5.6.2	Reff Tool	61

6	Implementierung und Evaluierung des Modells anhand eines exemplarischen Terminals	63
6.1	Ausgangslage	63
6.2	Eingabedaten	63
6.3	Ergebnisse der Berechnung	65
6.4	Ergebnisse und Interpretation	66
7	Diskussion	69
7.1	Limitationen	69
7.2	Implikationen	70
7.2.1	Für die Wissenschaft	70
7.2.2	Für die Wirtschaft	71
	Conclusio	73
8	Literaturverzeichnis	74

Abkürzungsverzeichnis

CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ e	Kohlendioxidäquivalent
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
Fraunhofer IML	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML
g	Gramm
GHG	Greenhouse Gas Protocol
GLEC	Global Logistics Emissions Council
Hub	Hauptumschlagbasis
IPCC	Intergovernmental Panel for Climate Change
KFZ	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
K-V	Kombinierter Verkehr
kWh	Kilowattstunde
LE	Ladeeinheit
LKW	Lastkraftwagen
m	Meter
PDF	Portable Document Format
SLR	Systematische Literaturrecherche
t	Tonne
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit
THG	Treibhausgas

Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht aller relevanten Normen und Standards.....	28
Tabelle 2: Suchkriterien	43
Tabelle 3: Inhaltsanalyse.....	48
Tabelle 4: Laut ISO 14083 zu berücksichtigende Prozesse	56
Tabelle 5: Eingesetzte Umschlaggeräte exemplarisches Terminal	63
Tabelle 6: Energie pro Ladeeinheit exemplarisches Terminal.....	65
Tabelle 7: GHG Emissionen pro Ladeeinheit exemplarisches Terminal	66
Abbildung 1: Funktionen Logistikzentrum.....	16
Abbildung 2: Vergleich der CO ₂ -Emissionen unterschiedlicher Verkehrsträger.....	18
Abbildung 3: Vergleich Kombiniertes Verkehr/reiner Straßentransport	19
Abbildung 4: Grenzen der Emissionen in Unternehmen	21
Abbildung 5: The Fuel Life Cycle.....	22
Abbildung 6: Quellen der CO ₂ -Emissionen zu den Scopes.....	23
Abbildung 7: Prozesse eines Kranspiels	24
Abbildung 8: Verbrauchsdaten	24
Abbildung 9: Systemdarstellung Kombiniertes Verkehr Straße Schiene.....	31
Abbildung 10: Verkehrsträger abhängig von Transportweg.....	33
Abbildung 11: Prozessschaubild Kombiniertes Verkehr	35
Abbildung 12: Portalkran in einem Umschlagterminal.....	38
Abbildung 13: Reach Stacker SANY Group	39
Abbildung 14: Leicht modifizierter Auswahlprozess relevanter Studien nach PRISMA	45
Abbildung 15: Deskriptive Analyse der Dokumenttypen.....	47
Abbildung 16: Deskriptive Analyse der Veröffentlichungsjahre	47
Abbildung 17: Deskriptive Analyse der Anzahl der Autoren.....	48
Abbildung 18: Beispiel Fraunhofer	54
Abbildung 19: Beispiel Fraunhofer Emissionsintensitäten	55

Abbildung 20: Beispiel Fraunhofer Ergebnisse	56
Abbildung 21: Berechnungslogik CO2-Kalkulationstool	58
Abbildung 22: EcoTransIT World Erweiterte Ansicht.....	60
Abbildung 23: REff Tool Annual data	61
Abbildung 24: Energieverbrauch in kWh exemplarisches Terminal	67
Abbildung 25: Emissionen in kg CO2e exemplarisches Terminal	68

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Der zunehmende Handel sorgt für immer größer werdende Warenströme, welche zu einem großen Teil auf der Straße abgefertigt werden. Der Straßengüterverkehr ist Wettbewerbsführer bezüglich den logistischen Anforderungen Schnelligkeit, Flexibilität und Zuverlässigkeit.¹ 19% des gesamten globalen Energieverbrauches werden vom Straßengüterverkehr verursacht. Dieser Wert soll in den nächsten Jahren bis 2050 um bis zu 100% steigen im Verhältnis zu den Angaben aus dem Jahr 2007. Insbesondere für den Transport von Gütern auf der Straße ist ein hohes Wachstum zu erwarten.²

Dieser Trend erhielt in den letzten Jahren eine immer lauter werdende Missachtung. Sowohl die steigende Belastung des Fernstraßennetzes als auch der mangelnde Fortschritt im Einsatz neuer Energiequellen sorgen für eine Menge Unmut. Aus diesem Grund soll der Schienenverkehr für die Beförderung von Gütern im innereuropäischen Raum in Zukunft eine essenzielle Rolle spielen. Die optimale Lösung bietet hierbei der kombinierte Verkehr. Dieser ermöglicht es, den Großteil einer Strecke auf der Schiene zu befördern und zudem im Vor- und Nachlauf Schnelligkeit, Flexibilität und Zuverlässigkeit zu garantieren. Berechnungen zeigten jedoch, dass sich der Einsatz von kombiniertem Verkehr erst ab einer Mindestentfernung von 300 bis 450 km wirtschaftlich rechnet.³

Der intermodale Transport sorgt für eine spezielle Herausforderung, nämlich den Umschlag von einem Verkehrsträger auf den nächsten. Umschlagterminals und deren Infrastruktur bieten hierfür einen entscheidenden Wendepunkt. Dieser Umschlag verursacht zusätzliche Kosten, welche daher so gering wie möglich gehalten werden sollen. Neben dem Kostenfaktor müssen auch die am Umschlagterminal entstandenen CO₂-Emissionen analysiert werden. Dies ist nur möglich durch eine detaillierte Bilanzierung aller entstandenen CO₂-Emissionen.⁴

Zur Berechnung der CO₂-Emissionen an Umschlagterminals werden in der Praxis meist Durchschnittswerte angenommen. Dennoch ist es für eine detaillierte Betrachtung der Emissionen entlang der gesamten Transportkette wichtig, alle Prozesse

¹ Vgl. Dr. Christoph Seidelmann (2010) S. 34ff.

² Vgl. Craig et al. (2013) S. 49

³ Vgl. Dr. Christoph Seidelmann (2010) S. 34ff.

⁴ Vgl. Bottani (2017) S. 76

miteinzubeziehen. Bei anfallenden Bilanzierungen werden hauptsächlich die Transportprozesse über die Straße bzw. Schiene betrachtet. Dennoch ist auch der Umschlagprozess nicht zu vernachlässigen und sollte mit Hilfe einer detaillierten Berechnung bestimmt werden. Denn durch Einsparungen an dieser Stelle wie zum Beispiel dem Einsatz von Elektromobilität können auch hier erheblich CO₂-Emissionen eingespart werden.⁵

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Ziel dieser Arbeit ist es ein Berechnungsmodell für die CO₂-Bilanzierung von Intermodalterminals zu entwerfen. Dieses Tool wurde für das Unternehmen KombiConsult GmbH entwickelt. Im Rahmen der Entwicklung wurde zunächst eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt, um den aktuellen Stand der Forschung aufzugreifen. Im Zuge dessen wurden alle gültigen Normen und Standards in diesem Bereich untersucht und als Grundlage für den Entwurf des Tools verwendet.

Es wurden folgende Forschungsfragen definiert:

- Wie lassen sich CO₂-Emissionen, die von Umschlag-/Ladevorgängen an Intermodalterminals verursacht werden, modellieren?
- Welche Berechnungs- und Modellierungsansätze für betriebliche Emissionen gibt es bereits in der Literatur?

Im Laufe der Entwicklung zeigte sich die besondere Relevanz des Themas der CO₂-Bilanzierung an Intermodalterminals. In der betrachteten Literatur sind kaum Werke für dieses Anwendungsgebiet aufzufinden. Daher wurde ein neuer Ansatz zur Berechnung entwickelt, welcher jedoch stark an die Erkenntnisse der aktuell gültigen Standards und Normen angelehnt wurde. Die Thematik der immer bedeutenderen Nachhaltigkeit in der Logistik spricht für diese Arbeit und die Umsetzung und Testung dieses Tools.

1.3 Methodik

Im ersten Schritt wurde eine Auswertung der Literatur zum Thema durchgeführt, diese zeigte, dass Berechnungstools für CO₂-Emissionen für Intermodalterminals kaum aufzufinden sind. Im Bereich der Schifffahrt sind eine Vielzahl an Studien, mit vielversprechenden Ergebnissen bekannt. Hierbei gibt es eine geringe Anzahl an Tools zur Berechnung aber auch eine Vielzahl an Fallstudien. Grundlagen für die CO₂-

⁵ Vgl. Achim Klukas et al. (2019). S. 22

Bilanzierung an Intermodalterminals bieten meist die geltenden Normen und Standards, wie beispielsweise das GHG-Protocol oder das GLEC-Framework. Auf Basis dieser Werke können weitere Tools entwickelt werden. Die herangezogenen Normen und Standards bieten umfangreiche Lösungsansätze zur Erstellung von CO₂-Bilanzen für den Transportsektor.

Im nächsten Schritt wurden verschiedene Terminals besucht, zur empirischen Datenerhebung und um ein Grundverständnis für die Prozesse zu erhalten. Um dieses Wissen verallgemeinern zu können, wurden Workshops mit Experten durchgeführt. Als ständige Ansprechpartner standen uns hierbei die Mitarbeiter der KombiConsult zur Seite. Aus den bereits gewonnenen Erkenntnissen entstand der Entwurf für eine erste Version des Tools. Mit Hilfe dieses Tools konnten an ausgewählten Terminals CO₂-Bilanzen erstellt werden und iterative Nachbesserungen angewandt werden. Im Laufe der Entwicklung wurde immer auf das Know How von Experten zurückgegriffen, um schließlich eine Anwendbarkeit in der Praxis sicherzustellen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die folgende Arbeit ist auf sechs Kapiteln aufgebaut, welche sowohl die Grundlagen des kombinierten Verkehrs und sowie die Berechnung von CO₂-Emissionen in Terminals erläutern als auch die Entwicklung eines Tools zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen und die Evaluierung der erhaltenen Ergebnisse dokumentieren.

Nach der Einleitung werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen der Emissionsbewertung in Logistikzentren erläutert. In diesem Kapitel werden die aktuell in diesem Bereich gültigen Normen und Standards vorgestellt und Methoden zur Bilanzierung der Treibhausgasemissionen diskutiert.

Kapitel 3 bietet im Anschluss daran eine Übersicht über den Kombinierten Verkehr, den dazugehörigen Ladeeinheiten beziehungsweise Verkehrsträgern und den Prozessen an einem solchen Terminal. Zudem werden Vorteile, Nachteile und aktuelle Herausforderungen dieses Transportbereiches behandelt.

In Kapitel 4 wird eine systematische Literaturrecherche zur Berechnung und Modellierung von Emissionen in Intermodalterminals durchgeführt. Hierbei wird der aktuelle Stand der Forschung ermittelt und diskutiert. Mit den gefundenen Studien wird sowohl eine deskriptive Analyse als auch eine Inhaltsanalyse durchgeführt.

In dem darauffolgenden Kapitel wird die Entwicklung des Berechnungsmodells betrachtet. Zunächst wird die Berechnungslogik vorgestellt, anschließend wird ein Unterkapitel der Erklärung der Entwicklung des Modells gewidmet. In diesem zeigt sich der Prozess von der Vorbereitung bis hin zu den Ergebnissen. Auch wird das Modell mit anderen bereits praktisch angewandten Tools verglichen. Im Anschluss daran erfolgt eine Evaluierung des Modells.

Im Kapitel 6 dieser Arbeit wird das Berechnungsmodell praktisch anhand eines exemplarischen Terminals vorgeführt und die erhaltenen Ergebnisse evaluiert und interpretiert.

Kapitel 7 behandelt eine Diskussion, in welcher Limitationen und Implikationen erläutert werden. Es werden die Grenzen der Arbeit und mögliche Erweiterungen in der Wissenschaft und Wirtschaft beschrieben.

2 Theoretische Grundlagen der Emissionsbewertung in Logistikzentren

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen von Logistikzentren betrachtet, ihre Aufgaben, Arten und beispielhafte CO₂-Bilanzen. Anschließend wird der Begriff „Nachhaltigkeit“ in der Logistik erläutert und hinterfragt. Darauf aufbauend erfolgt die Vorstellung aller geltenden Normen und Standards in diesem Bereich und ein umfangreicher Vergleich dieser.

2.1 Grundlagen Logistikzentren

Die Verkehrsinfrastruktur besteht aus Verkehrsnetzen und Logistikzentren. Entlang der Verkehrsnetze werden Waren transportiert, welche in den Logistikzentren umgeschlagen, zwischengelagert und sortiert werden. Da diese einen erheblichen Teil zur Wirtschaftlichkeit des Transports von Waren und Gütern beitragen sollte auch der Emissionsausstoß dieser ermittelt und bewertet werden. In der Literatur findet man viele Ansätze, um CO₂-Emissionen in den Verkehrsnetzen zu messen, welche auch schon seit einigen Jahren erfolgreich angewandt werden. Jedoch sollte auch den Logistikzentren eine gewisse Aufmerksamkeit gelten, da immer der Gesamtprozess betrachtet werden muss.⁶

In Logistikzentren kommen die Waren von den Lieferanten an, wie in Abbildung 1 ersichtlich, werden diese zunächst geprüft und anschließend weiterbearbeitet. Je nach Gut und Art des Logistikzentrums werden diese unterschiedlich lange eingelagert, kommissioniert und anschließend verpackt. Danach erfolgt der Versand an den Kunden, dies kann der Endkunde sein, aber auch ein weiteres Logistikzentrum. Nach Ende des Produktlebenszyklus erfolgt der Rücklauf der Waren über einen sehr ähnlichen Weg.⁷

⁶ Vgl. Martin (2014) S.123

⁷ Vgl. Jakob Tuna (2021)., S. 18

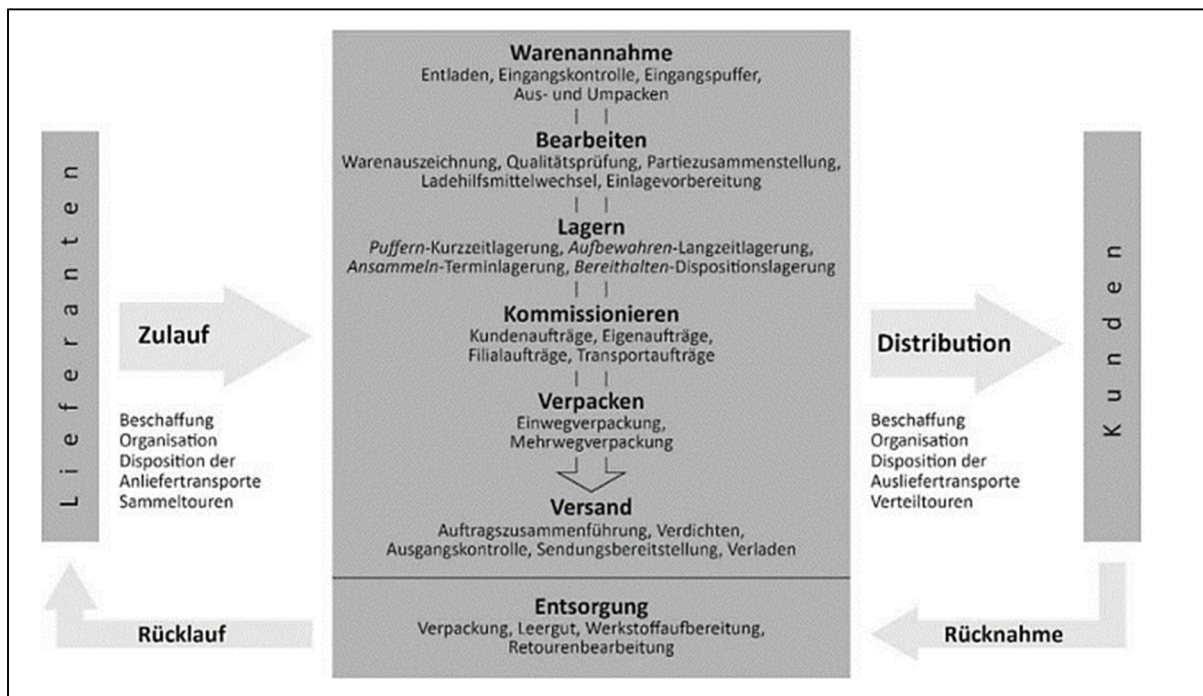


Abbildung 1: Funktionen Logistikzentrum⁸

2.1.1 Arten von Logistikzentren

Es wird zwischen drei Arten von Logistikzentren unterschieden. Die gerade eben genannten sind die Transferzentren, diese führen keine Lagerfunktionen aus. Die eingegangenen Güter werden nicht eingelagert, sondern sofort kommissioniert und weiter versendet. Dadurch ist der Aufwand, der in diesen Lagern betrieben wird, vergleichsweise gering.⁹

Die wohl bekannteste Art von Logistikzentren sind die Distributionszentren. An diesen Standorten werden die Güter gelagert und für die weitere Lieferung kommissioniert. Die Kosten in Distributionszentren sind wie zu erwarten höher als beispielsweise in Transferzentren.¹⁰

Terminals, die für den Umschlag von Straße auf Schiene und umgekehrt eingesetzt werden, zählen meist zu den Distributionszentren. Eine genaue Zuteilung ist nicht bekannt. Waren werden entweder direkt weitertransportiert oder eingelagert.¹¹

⁸ Jakob Tuna (2021).

⁹ Vgl. (2023b).

¹⁰ Vgl. (2023b).

¹¹ Vgl. Clausen; Geiger (2013) S. 263

Die dritte Art sind die Distributionsverarbeitungscentren, diese erledigen zusätzlich zu den Aufgaben eines Distributionszentrums noch weitere komplexe Prozesse. Beispielsweise werden Lebensmittel verarbeitet oder Teile bereits montiert.¹²

2.2 Nachhaltigkeit in der Transportlogistik

Der Begriff „Nachhaltigkeit“ weist auf sämtliche Handlungen hin, die nachfolgende Generationen nicht beeinträchtigen. Natürliche Ressourcen sollten nur in Anspruch genommen werden, wenn sich diese in dem gleichen Maße reproduzieren. Dies gilt auch für an die Umwelt abgegebene Schadstoffe: die Menge an produzierten Emissionen sollte nur so hoch sein, wie die Natur fähig ist diese wieder abzubauen.¹³

Um Waren bewegen zu können, wird Energie verbraucht. Durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen wird Energie freigesetzt, diese wird dann für den Antrieb verwendet. Der Straßenverkehr ist hauptsächlich vom Energieträger Diesel abhängig. Dahingegen werden auf den innereuropäischen Hauptstrecken Lokomotiven mit elektrischem Antrieb eingesetzt. Die dafür benötigte Energie stammt zu einem großen Teil von Nuklear- und Wasserkraftwerken. In Zukunft entsteht immer mehr Energie durch den Einsatz erneuerbarer Ressourcen, wodurch die dabei entstandenen CO₂-Emissionen erheblich reduziert werden oder ganz vernachlässigt werden können. Die einzige Alternative Transporte von der Straße auf die Schiene verlegen zu können, ist der Umstieg auf den kombinierten Verkehr.¹⁴

Folgende Abbildung (Abbildung 2) zeigt beispielhafte Werte für entstandene CO₂-Emissionen für die Verkehrsträger: LKW, Binnenschiff und Ganzzug und zeigt deutlich den anhaltenden Trend der CO₂-Emissionen in Gramm pro Tonnenkilometer.

¹² Vgl. (2023b).

¹³ Vgl. Daly (1990) S. 1-6

¹⁴ Vgl. Dr. Christoph Seidelmann (2010). S. 62f.



Abbildung 2: Vergleich der CO2-Emissionen unterschiedlicher Verkehrsträger¹⁵

In der Studie „Estimating the CO2 intensity of intermodal freight transportation“ wurden die Auswirkungen vom Umstieg von Transporten auf der Straße, zu Transporten auf der Schiene untersucht. Es zeigte sich, dass die Höhe der CO2-Einsparungen abhängig von der zurückgelegten Strecke ist. Der Wert für die CO2-Emissionen pro Tonnenkilometer schwankt zwischen 29 und 220g.¹⁶

Die wichtigsten verursachten Emissionen in der Logistik sind Feinstaub und Treibhausgase. Feinstaub ist insbesondere für den Menschen gefährlich, da diese kleinen Partikel ihren Weg bis in den Blutkreislauf finden können. Diese werden daraufhin nicht wieder ausgeschieden und können die Ursachen chronischer Erkrankungen darstellen.¹⁷

2.2.1 Emissionen im kombinierten Verkehr

Das Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU) hat zusammen mit der Studiengesellschaft für den kombinierten Verkehr e.V. (SGKV) eine wissenschaftliche Studie veröffentlicht, welche die CO2 Emissionen im Straßengüterverkehr mit denen im kombinierten Verkehr (Straße/Schiene) vergleicht.

Die Studie hat verschiedene Strecken gewählt und diese für beide Verkehrsträger analysiert, wie in Abbildung 3 ersichtlich ist. Es hat sich gezeigt, dass die Strecken umso besser abgeschnitten haben, je höher der Anteil an Atomenergie des Strommix, welcher für den Betrieb auf der Schiene verwendet wird, ist.¹⁸

¹⁵ Achim Klukas et al. (2019) S. 13

¹⁶ Vgl. Craig et al. (2013) S. 49, 53

¹⁷ Vgl. Clausen; Geiger (2013) S.21f.

¹⁸ Vgl. IFEU; SGKV (2002) S.4

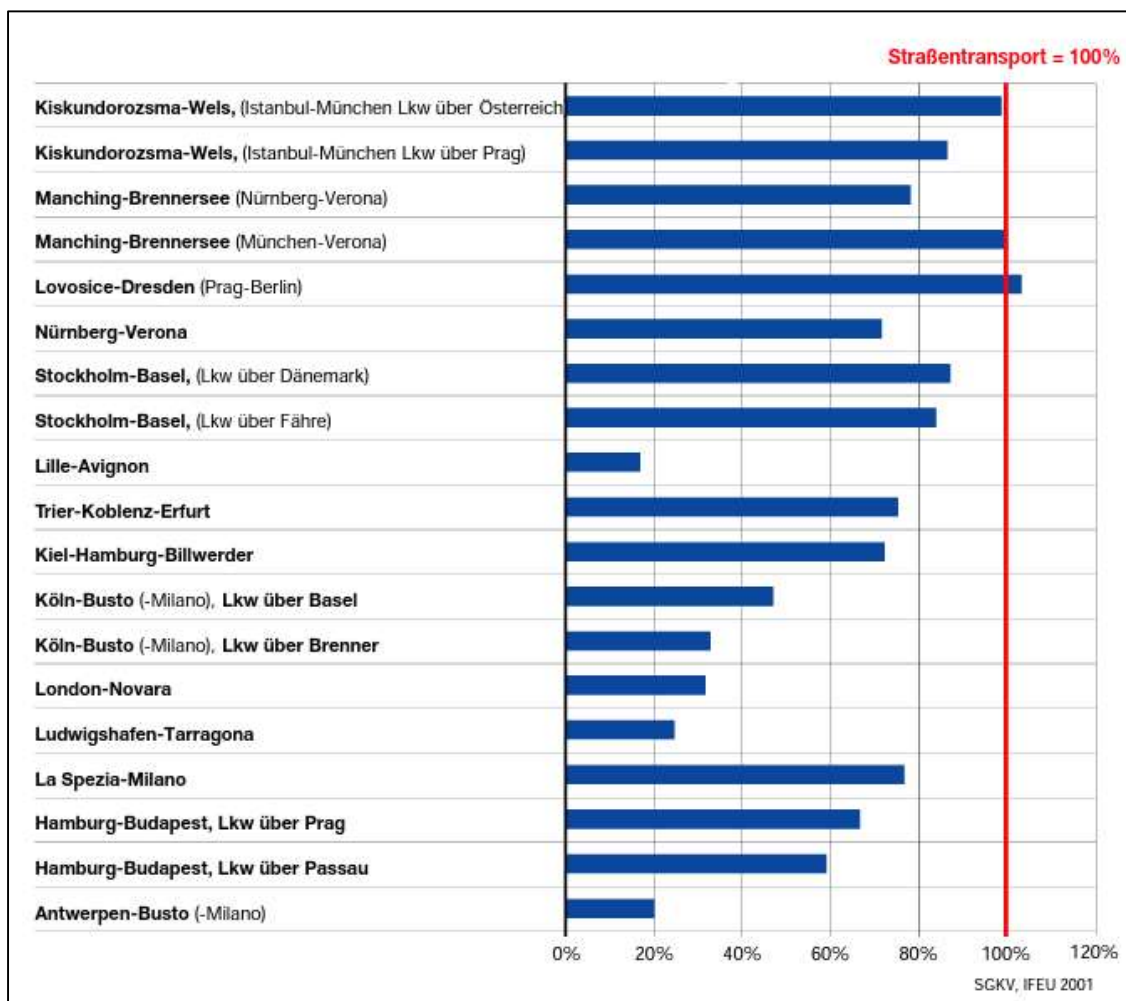


Abbildung 3: Vergleich Kombiniertes Verkehr/reiner Straßentransport¹⁹

Man kam zu dem Ergebnis, dass folgende Faktoren einen besonderen Einfluss auf das Verbrauchsgeschehen haben:

- Zugauslastung (Umso länger ein Zug ist, desto geringer sind die entstandenen CO₂-Emissionen)
- Lage des Versandortes und Zielortes
- Der bereits angeführte Punkt des Anteiles an Kernenergie
- Verwendete Ladeeinheit²⁰

2.2.2 Treibhausgase

Zu den Treibhausgasen zählen gasförmige Stoffe wie Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Methan. Diese sorgen für den sogenannten Treibhauseffekt, da sie die abgestrahlte Wärme der Erdoberfläche absorbieren und somit neben dem

¹⁹ IFEU; SGKV (2002) S. 4

²⁰ Vgl. IFEU; SGKV (2002) S. 5, 7, 9f.

Sonnenlicht die Erde erwärmen. Dieser Effekt hat sich in den letzten Jahren erheblich verstärkt, was auf den starken fossilen Energieverbrauch des Menschen, zurückzuführen ist.²¹ Aus diesem Grund wurde im Jahr 1997 ein Klimaschutzabkommen des Weltklimagipfels beschlossen, welches die Industriestaaten dazu verpflichtete, ihre Emissionen von 2008 bis 2012 erheblich zu senken. Die EU-15-Staaten haben dieses Ziel erreicht und teilweise sogar übertroffen. Jedoch schwankt dieser Wert stark je nach Sektor. So konnten die Emissionen in der verarbeitenden Industrie um 23,4% gesenkt werden, im Transport stiegen diese jedoch um 15,6% an. Ende 2012 wurde das Klimaschutzabkommen auf das Jahr 2020 verlängert.²²

Es gibt sechs klimarelevante Treibhausgase:

- Kohlendioxid (CO₂)
- Methan (CH₄)
- Distickstoffoxid (N₂O)
- Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC)
- Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC) und
- Schwefelhexafluorid (SF₆)²³

Das wichtigste Gas ist Kohlendioxid, dieses gilt als Grundlage für alle anderen Treibhausgase. Die anderen Gase werden als Vielfaches von CO₂ angegeben, ihr Global Warming Potential (GWP) wird im Verhältnis zu CO₂ herangezogen. Dadurch, dass alle Gase in Kohlendioxid umgerechnet werden, ergibt sich die Einheit CO₂e (Kohlendioxidäquivalent), welche als die Standardeinheit für Treibhausgase festgelegt ist.²⁴

Diese Umrechnungen werden vom Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) veröffentlicht. Die aktuell gültige Ausgabe ist die fünfte und stammt aus dem Jahr 2013. Bei der Verwendung von Emissionsfaktoren zur Berechnung, ist es besonders wichtig hierbei auf die aktuell gültigen Daten zu achten.²⁵

²¹ Vgl. (2023c)

²² Vgl. Clausen; Geiger (2013). S. 22ff.

²³ Clausen; Geiger (2013). S. 25

²⁴ Vgl. Clausen; Geiger (2013) S. 25

²⁵ Vgl. Kerstin Dobers et al. (2019). S.14

2.2.3 Bilanzierung der Treibhausgasemissionen

Um Treibhausgasemissionen senken zu können, müssen zunächst alle relevanten Emissionen ermittelt werden. Im Anschluss werden diese nach unterschiedlichen Anforderungen zusammengefasst. Das Greenhouse Gas Protocol (GHG) bietet einen internationalen Standard, um entstandene Emissionen in direkte und indirekte Emissionen einzuteilen. Dabei gibt es drei Scopes, welche in Abbildung 4 visualisiert sind. Scope 1 beinhaltet alle direkten Emissionen, die durch das Unternehmen selbst verursacht werden, wie beispielsweise unternehmenseigene Fahrzeuge und Gebäude. Scope 2 umfasst indirekte Emissionen, die durch die Hinzunahme von externem Strom entstehen. Alle Emissionen entlang der Wertschöpfungskette des Unternehmens, auf welche das Unternehmen direkten keinen Einfluss hat, werden als Scope 3 Emissionen bezeichnet.²⁶

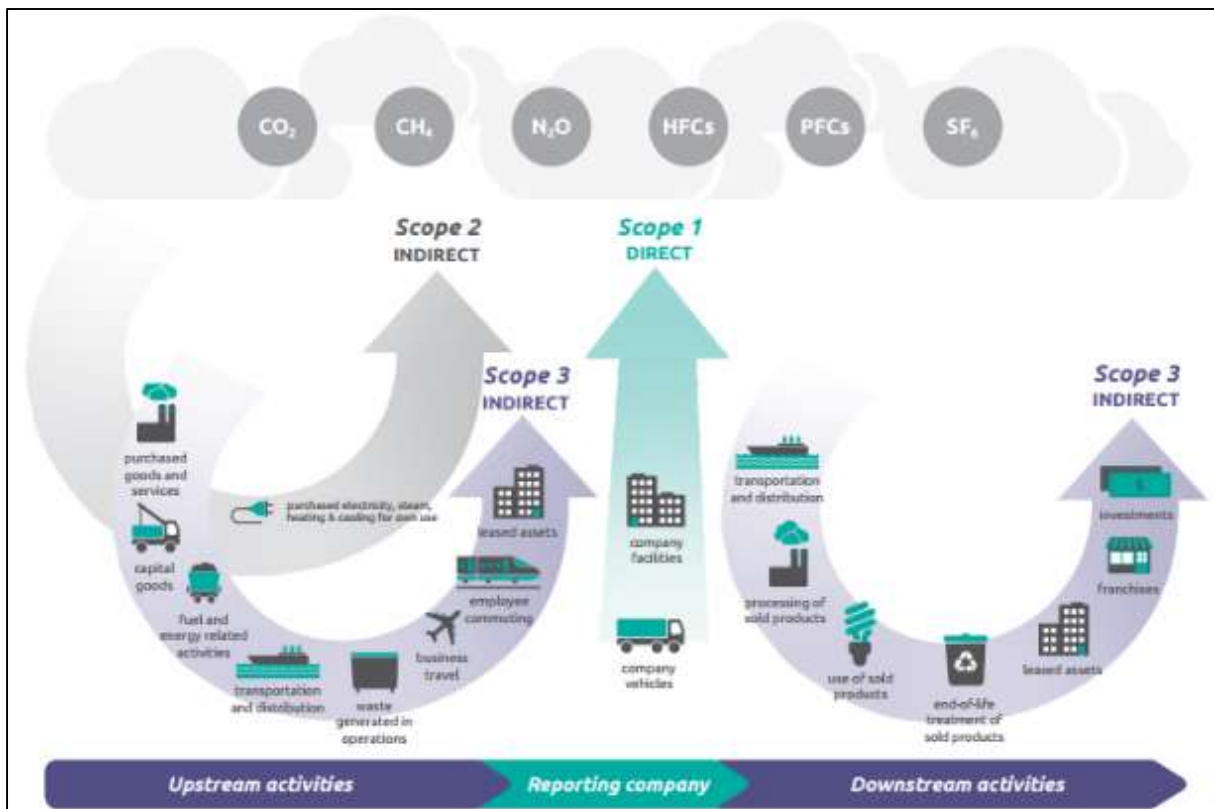


Abbildung 4: Grenzen der Emissionen in Unternehmen²⁷

Transportemissionen können auch betrachtet werden, indem man die Emissionen rein auf die Transportprozesse bezieht, wie in Abbildung 5 ersichtlich. Dabei stellt die Bezeichnung Tank-to-Wheel (TTW) alle Emissionen, die während des Transportes

²⁶ Vgl. Guide for Greenhouse Gas E S. 13

²⁷ (2023f).

entstehen, dar. Im Gegensatz dazu werden in einem anderen Aspekt alle Prozesse, die dem Transport vorgelagert sind, betrachtet. Dazu zählt die gesamte Rohstoffgewinnung, dieser Prozess wird Well-To-Tank (WTT) genannt. Wenn beide Sichtweisen vereint werden, bezeichnet man dies als Well-To-Wheel (WTW).²⁸

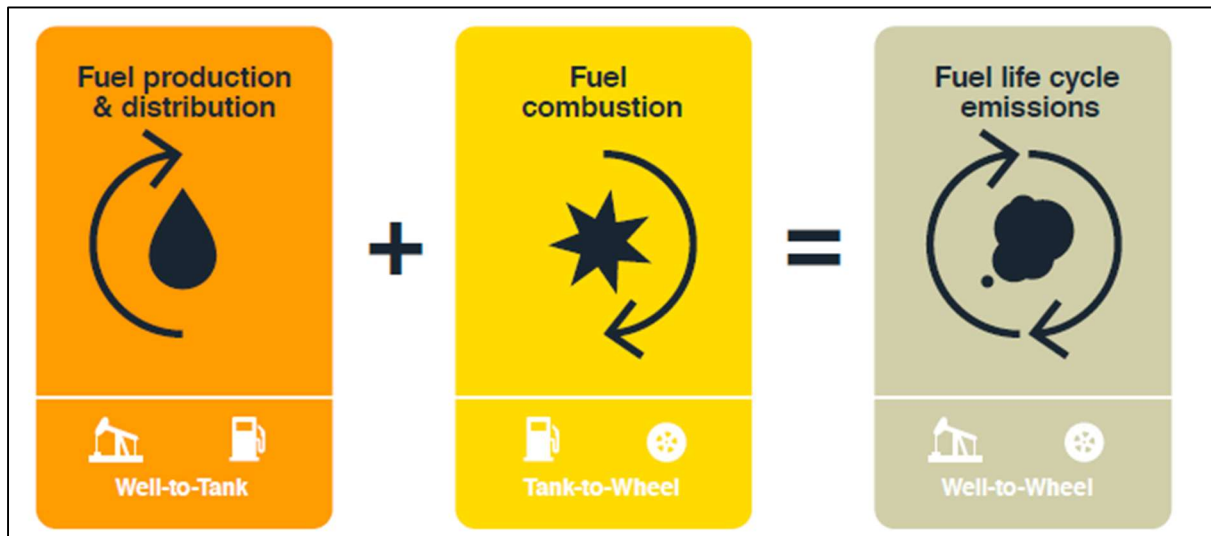


Abbildung 5: The Fuel Life Cycle²⁹

2.3 CO₂-Emissionen in Logistikzentren

Dieses Kapitel bietet einen Exkurs zu Emissionen, die in Distributionszentren und Umschlagterminals entstehen.

2.3.1 Distributionszentrum

In diesem Kapitel wurde eine Arbeit herangezogen, die die Erstellung einer CO₂-Bilanz eines Distributionszentrums behandelt. Sämtliche Behauptungen entsprechen dabei den in dieser Arbeit getroffenen Annahmen. Zunächst müssen bei der Berechnung der CO₂-Emissionen einige Systemgrenzen festgelegt werden. Es werden sämtliche vor- bzw. nachgelagerte Prozesse nicht berücksichtigt. Zudem werden alle indirekten Emissionen (Scope 3) ebenfalls für die folgende Berechnung vernachlässigt. Lediglich Emissionen, welche von den Mitarbeitern bei der Anfahrt zu dem Logistikzentrum entstehen, werden mitbetrachtet. Eine Aufstellung aller Energieverbräuche, die berücksichtigt werden und eine Aufteilung dieser gemäß den drei Scopes wird in Abbildung 6 dargestellt.³⁰

²⁸ Vgl. Clausen; Geiger (2013) S. 26f.

²⁹ Vgl. Suzanne Greene; Alan Lewis (2019) S. 17

³⁰ Vgl. Alexander Weiss (2014). S. 61f.

	Intralogistik – Lager	Logistikimmobilie – Halle
Scope 1 (direkte THG- Emissionen)	Kraftstoffverbrauch Transportsystem (z.B. Stapler)	Brennstoffverbrauch Klimasystem (z.B. Heizung)
	Kältemittelverbrauch Lagersystem (z.B. Kühlager)	Kältemittelverbrauch Klimasystem (z.B. Klimaanlage)
Scope 2 (energiebedingte indirekte THG- Emissionen)	Stromverbrauch Lagersystem (z.B. Regalbediengerät)	Stromverbrauch Klimasystem (z.B. Lüftungsanlage)
	Stromverbrauch Fördersystem (z.B. Rollenförderer)	Stromverbrauch Gebäudetechnik (z.B. Warmwasseraufbereitung)
	Stromverbrauch Transportsystem (z.B. Stapler)	Wasser-/Dampfverbrauch Klimasystem (z.B. Fernwärme)
Scope 3 (andere indirekte THG- Emissionen)	Mitarbeiteranfahrt (z.B. Zug)	Mitarbeiteranfahrt (z.B. PKW)

Abbildung 6: Quellen der CO2-Emissionen zu den Scopes³¹

Die Hauptverursacher für einen hohen CO2 Ausstoß in Logistikzentren sind die Beleuchtung und die Klimatisierung. Einen bedeutenden Vorteil bringt ebenso der Einsatz erneuerbarer Energien.³²

2.3.2 Umschlagterminal

Es wird nun eine Arbeit vorgestellt, welche mittels Simulation die CO2-Emissionen verursacht durch multimodale Umschlaggeräte, verfasst von Jan Kaffka, Uwe Clausen und Zoran Miodrag, darstellt. Umschlaganlagen für den kombinierten Verkehr verursachen rund 25% der gesamten für den Transport entstandenen CO2-Emissionen. In dieser Arbeit wird der Umschlag mittels Kran näher untersucht.³³

Ein Arbeitsspiel des Kranes stellt dabei folgende Prozesse, wie in Abbildung 7 ersichtlich ist, dar.

³¹ Alexander Weiss (2014) S. 65

³² Vgl. Alexander Weiss (2014) S. 74f.

³³ Vgl. Jan Kaffka et al. (2015) S. 565, 568

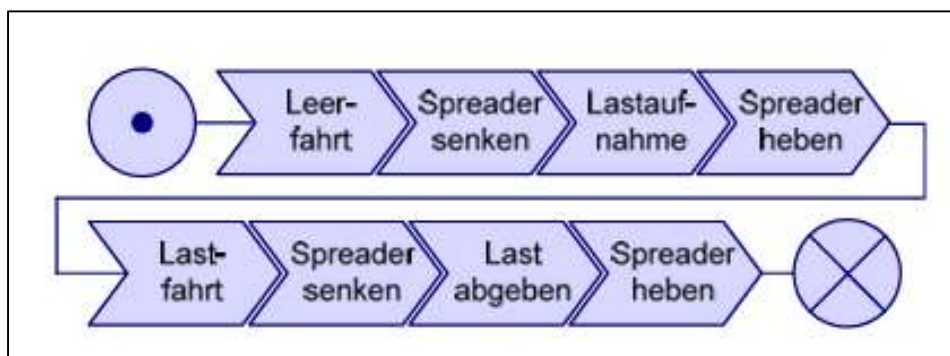


Abbildung 7: Prozesse eines Kranspiels³⁴

Zunächst erfolgt eine Leerfahrt zur Ladeeinheit, anschließend wird diese mittels Spreader angehoben und transportiert. Die Last wird abgegeben und das Arbeitsspiel beginnt wieder von vorne. Die Simulation wird anhand von einem trimodalen Umschlagterminal durchgeführt. Es werden jährlich 150.000 TEU umgeschlagen.³⁵

Container	Ø-Zeit	Ø-KWh	Ø-€/KWh	Ø-KG CO ₂ /KWh	Ø- Wegstrecke[m]
20 Fuß Leer	0:02:58	3,65	0,40	1,56	88,84
40 Fuß Leer	0:02:47	3,09	0,34	1,32	66,68
20 Fuß Leicht	0:03:00	4,02	0,44	1,72	124,14
40 Fuß Leicht	0:03:30	3,48	0,38	1,49	84,60
20 Fuß Mittel	0:02:50	3,14	0,35	1,34	180,35
40 Fuß Mittel	0:05:51	3,63	0,40	1,55	72,06
20 Fuß Schwer	0:03:00	4,19	0,46	1,79	95,23
40 Fuß Schwer	0:02:42	3,82	0,42	1,63	123,99

Abbildung 8: Verbrauchsdaten³⁶

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der Simulation. Neben der Einteilung der Container wurden auch der zurückgelegte Weg berücksichtigt. Letzterer zeigt einen bedeutsamen Einfluss auf das Ergebnis der CO₂-Emissionen. Durchschnittlich verursacht ein Containerumschlag 1,55 kg CO₂. Hervorzuheben ist auch, dass ein höheres Gewicht der Container nicht ausschließlich zu größeren Emissionen führt.³⁷

³⁴ Jan Kaffka et al. (2015) S. 569

³⁵ Vgl. Jan Kaffka et al. (2015) S. 569ff.

³⁶ Jan Kaffka et al. (2015) S. 572

³⁷ Vgl. Jan Kaffka et al. (2015) S. 572

2.4 Geltende Normen zur Berechnung von CO₂-Emissionen

Um Emissionen in Unternehmen reduzieren zu können, ist es wichtig zu wissen, wie hoch die Menge an verursachten Treibhausgas-Emissionen beträgt.

Im Bereich der Bilanzierung dieser CO₂ Emissionen existieren eine Vielzahl an geltenden Normen und Standards, welche Unternehmen als Vorlage verwenden können.

2.4.1 DIN EN 16258

Die DIN EN 16258 ist eine Norm zur Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen, sie tritt Anfang 2013 in Kraft und wurde 2023 von der EN ISO 14083 abgelöst. Diese gilt sowohl für den Güter- als auch den Personenverkehr. Zudem werden hierbei auch alle Transportsektoren und ihre Komplexitätsstufen betrachtet, um auf verschiedenen Detailebenen Ergebnisse liefern zu können. Die Emissionen werden gemäß dem Well-To-Wheel Ansatz berechnet, somit werden auch die Emissionen, die im Zusammenhang mit den Prozessen zur Energiegewinnung der Fahrzeuge, erzeugt werden, berücksichtigt.³⁸

Die genannte Norm beinhaltet jedoch keine Prozesse, die dem Umschlag angehören:

„Prozesse zum Bewegen oder für den Umschlag von Frachtgut, zum Bewegen von Passagieren, die durch externe Handhabungs- oder Umschlageinrichtungen (für Fracht) oder externe Bewegungsvorrichtungen (für Passagiere, wie z. B. Aufzüge oder Fahrsteige) erfolgen. Bei Express-Dienstleister und anderen in Netzen organisierten Transportdienstleistungen gehören zu dieser Kategorie von Prozessen Handhabungsvorgänge, die innerhalb von Einrichtungen erfolgen und aus dem Verladen und Entladen von Paketen oder Paletten bestehen;“³⁹

2.4.2 EN ISO 14083

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, ist die derzeit geltende Norm die EN ISO 14083, ein erster Entwurf dieser wurde im Jahr 2022 vorgestellt. Die Norm liefert ein Leitbild für die Quantifizierung und Berichterstattung der Treibhausgasemissionen von Transportvorgängen. Die Betrachtung basiert auf Aktivitäts-Kategorien und deren Mengen sowie Treibhausgas (THG)-Aktivitätskategorien und deren Mengen. Ebenso

³⁸ Vgl. Austrian Standards International (2013). S. 5

³⁹ Austrian Standards International (2013) S. 12

wie in der Norm DIN EN 16258 werden alle Verkehrsträger und Transportsektoren behandelt. Der Unterschied zwischen diesen beiden Normen ist, dass die EN ISO 14083 auch Emissionen, welche an Hubs entstehen, berücksichtigt.⁴⁰

2.4.3 GLEC-Framework

Das GLEC-Framework (Global Logistics Emissions Council) bietet Unternehmen eine Grundlage, um ihre Emissionen berechnen und bewerten zu können. Im Jahr 2016 wurde das erste veröffentlicht, die Version 1.0 bietet eine Grundlage der Methodik und Begrifflichkeiten. Im weiteren Entwicklungsprozess wurde im Jahr 2019 die Version 2.0 vorgestellt, um kleine Lücken zum Vorgänger zu schließen und klare Umsetzungsschritte für Unternehmen zu liefern. Im September 2023 wurde die Version 3.0 veröffentlicht.⁴¹

Das Framework bietet einen wichtigen Schritt zur standardisierten Berechnung der Emissionen. Die Version 2.0 ist in zwei Bereiche aufgeteilt. Im Bereich 1 werden die Berechnungen vorgestellt, die Grundlagen des GLEC-Framework, die drei verschiedenen Scopes und zusätzliche Informationen für jeden Verkehrsträger und Logistikstandort. Im Bereich 2 wird erläutert, wie die Berechnungsergebnisse verwendet werden können, Informationen und Beispiele zur Berichterstattung und Möglichkeiten zur Reduzierung der CO₂-Emissionen sind hierbei aufzufinden.⁴²

Ziel des GLEC-Frameworks ist es, die gesamte Transportkette zu betrachten. Ebenso wie alle Verkehrsträger. Es wird zudem der gesamte Lebenszyklus der Energieträger betrachtet (Well-to-Wheel).⁴³

2.4.4 Fraunhofer IML: Anleitung zur Bilanzierung von Treibhausgasen in Logistikzentren

In dem Kapitel 5.3 Berechnungslogik nach Fraunhofer, wird ein Artikel, welcher von Fraunhofer IML veröffentlicht wurde, vorgestellt. Die Grundlagen der Berechnungen, die darin aufgestellt werden, sind auch in dem im Rahmen dieser Arbeit entwickeltem Tool wiederzufinden. Bei der Adaption dieser Logik wurden einige Begriffe umbenannt bzw. ergänzt, diese Änderungen finden sich in Kapitel 5.4.

⁴⁰ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (ON) (2022) S. 10

⁴¹ Vgl. Suzanne Greene; Alan Lewis (2019) S. 2

⁴² Vgl. Suzanne Greene; Alan Lewis (2019) S. 10

⁴³ Vgl. Suzanne Greene; Alan Lewis (2019) S. 17

Die Berechnungslogik basiert auf den Annahmen des GLEC-Frameworks Version 2.0 und somit den geltenden Normen und Standards und dem EcoTransIT World.⁴⁴

2.4.5 Greenhouse Gas Protocol

Das GHG-Protocol wurde im Jahr 1998 von der World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) und dem World Resources Institute (WRI) ins Leben gerufen. Es bietet eine umfangreiche Möglichkeit CO₂-Emissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu berechnen. Zudem bietet es die Grundlage für eine detaillierte Berichterstattung.⁴⁵

Im Gegensatz zu den zuvor angeführten Normen und Standards kann das GHG-Protocol auf alle Unternehmensbereiche angewandt werden.⁴⁶

Die Emissionen werden in drei Scopes eingeteilt, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben. Für jeden Scope gibt es einen Leitfaden. Es gibt verschiedene Standards wie zum Beispiel den Unternehmensstandard (Corporate Standard), Produktstandard (Product Life Cycle Standard) und den Standard für Maßnahmen der Politik (Policy and Action Standard).⁴⁷

⁴⁴ Vgl. Kerstin Dobers et al. (2019) S. 9f.

⁴⁵ Vgl. (2023a)

⁴⁶ Vgl. (2023a).

⁴⁷ Vgl. (2023a).

2.4.6 Übersicht aller geltenden Normen und Standards

Tabelle 1: Übersicht aller relevanten Normen und Standards⁴⁸

	DIN EN 16258	EN ISO 14083	GLEC- Framework	Fraunhofer IML	Greenhouse Gas Protocol
Ziel	Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen	Quantifizierung und Berichterstattung der Treibhausgasemissionen von Transportvorgängen mit Einbezug der Umschlagsaktivitäten	Berechnung und Bewertung der Emissionen	Berechnung der Emissionen an Terminals	Bilanzierung von Treibhausgasemissionen
Scopes	Scope 1, 2, 3	Scope 1, 2, 3	Scope 1, 2, 3	Scope 1, 2, 3	Scope 1, 2, 3
Beinhaltet	Gesamte Transportkette (direkte und indirekte Emissionen), excl. Hub-Vorgänge	Gesamte Transportkette (direkte und indirekte Emissionen), incl. Hub-Vorgänge	Gesamte Transportkette (direkte und indirekte Emissionen),	Emissionen, die am Terminal entstehen	Alle Emissionen entlang der Wertschöpfungskette

⁴⁸ Vgl. Austrian Standards International (2013); Österreichisches Normungsinstitut (ON) (2022); Suzanne Greene; Alan Lewis (2019); Dobers, Kerstin (Fraunhofer IML) (2023); (2023a).;

			incl. Hub- Vorgänge		
Beinhaltet nicht	Prozesse zum Bewegen oder für den Umschlag von Frachtgut, zum Bewegen von Passagieren, die durch externe Einrichtungen erfolgen	Bei Hub-Vorgängen: Ein- und ausgehende Transportvorgänge des vorherigen oder nachfolgenden Transportkettenelements	Keine Systemgrenzen	Fahrzeuge, die Ladungsträger transportieren, die für den ein-/ausgehenden Verkehr genutzt werden	Keine Systemgrenzen
Umweltkenngößen	CO2-Äquivalente	CO2-Äquivalente	CO2-Äquivalente	CO2-Äquivalente	CO2-Äquivalente
Emissionsintensitäten	Genauere Angaben	Genauere Angaben	Genauere Angaben	Keine Angaben	Genauere Angaben
Grundlage	/	/	GHG	GLEC-Framework, EcoTransIT World	/

3 Grundlagen zu Intermodalterminals als Schnittstelle im kombinierten Verkehr

Kapitel 3 behandelt die theoretischen Grundlagen für Intermodalterminals. Neben den Grundlagen eines solchen Terminals werden Umschlaggeräte, aber auch Herausforderungen und Stärken dieser diskutiert.

3.1 Definition

Als „intermodal“ werden alle Transportsysteme bezeichnet, die zumindest zwei unterschiedliche Verkehrsträger verbinden. Zu den möglichen Einsatzgebieten zählen die Wasserstraße, Schiene und Straße.⁴⁹

Eine besondere Form des intermodalen Verkehrs stellt der kombinierte Verkehr dar, welcher durch eine EU-Richtlinie eindeutig definiert wird:

„Im Sinne dieser Richtlinie gelten als „kombinierter Verkehr“ Güterbeförderungen zwischen Mitgliedstaaten, bei denen der Lastkraftwagen, der Anhänger, der Sattelanhänger mit oder ohne Zugmaschine, der Wechselaufbau oder der Container von mindestens 20 Fuß Länge die Zu- und Ablaufstrecke auf der Straße und den übrigen Teil der Strecke auf der Schiene oder auf einer Binnenwasserstraße oder auf See, sofern diese mehr als 100 km Luftlinie beträgt, zurücklegt, wobei der Straßenzu- oder -ablauf erfolgt.“⁵⁰

Die im Rahmen des Kombinierten Verkehrs bewegte Transporteinheit kann sowohl rein die Ladeinheit sein als auch die Ladeinheit in Verbindung mit einem Transportmittel. Eine Ladeinheit wird definiert über die Güter, die im Zuge des Umschlags durch einen Ladungsträger gebündelt werden. Diese Ladeinheiten sind meist genormt.⁵¹

Ein weiteres Einsatzgebiet des kombinierten Verkehrs sind Chemiegut-Transporte. Neben der Entlastung der Straßen trägt diese Art von Transport erheblich zur Verkehrssicherheit bei, Unfallraten sind auf der Schiene um den Faktor 40 weniger als auf der Straße. Dieser Aspekt ist bei dieser Betrachtung von hoher Bedeutung, da viele

⁴⁹ Vgl. Dr. Christoph Seidelmann (2010) S. 10

⁵⁰ Der Rat der europäischen Gemeinschaften (1992) Artikel 1

⁵¹ Vgl. Clausen; Geiger (2013) S. 253

der transportierten Chemieprodukte toxisch sind und Unfälle im Straßenverkehr äußerst problematisch werden können.⁵²

Wie in Abbildung 9 visualisiert, unterscheidet man bei der Durchführung des Kombinierten Verkehrs zwischen Unbegleitetem Kombinierten Verkehr und Begleitetem Kombinierten Verkehr.

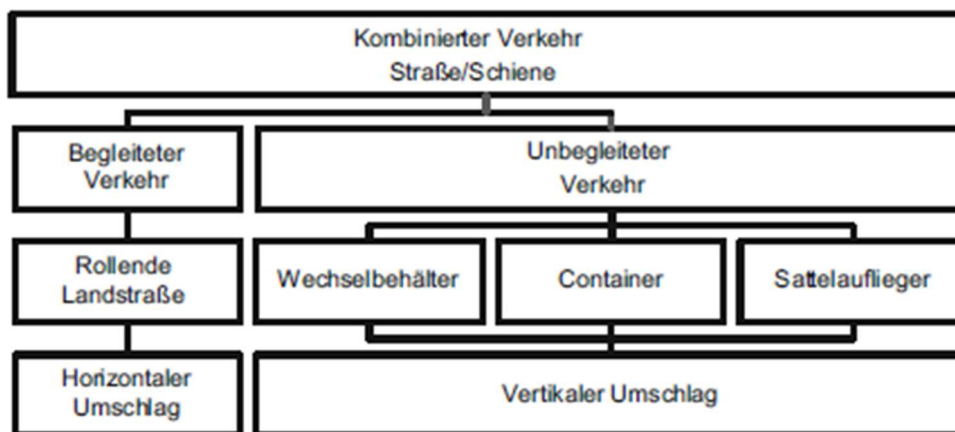


Abbildung 9: Systemdarstellung Kombinierten Verkehr Straße Schiene⁵³

Der Begleitete Kombinierte Verkehr zeichnet sich dadurch aus, dass nicht nur die Ladeeinheit transportiert wird, sondern das gesamte Fahrzeug. Dies bedeutet, dass der LKW samt Motorwagen und Ladung auf dem Eisenbahnwagen oder dem Binnenschiff transportiert wird. Demnach begleitet auch der LKW-Fahrer den Transport, um sowohl davor als auch danach den LKW bewegen zu können. Die auf der Schiene verbrachte Zeit dient dem LKW-Fahrer als Ruhepause. Geschieht dieser Begleitete Kombinierte Verkehr auf der Schiene, wird er auch als Rollende Landstraße bezeichnet, geschieht er am Schiff, wird er als schwimmende Landstraße bezeichnet. Der Unbegleitete Kombinierte Verkehr wird im Gegensatz zu Vorherigem öfter angewendet und zeichnet sich dadurch aus, dass der Transport nur mit den Ladeeinheiten durchgeführt wird. Zu den möglichen Ladeeinheiten zählen hierbei einerseits stapelbare wie zum Beispiel ISO-Container oder nicht stapelbare wie Wechselbrücken und Sattelaufleger. Bei dieser Form des Transportes erfordert der Umschlag der Ladeeinheiten einen höheren Aufwand. Dieser kann sowohl vertikal als auch horizontal mittels geeigneter Förderer erfolgen.⁵⁴

⁵² Vgl. Dr. Christoph Seidelmann (2010) S. 33

⁵³ Clausen; Geiger (2013) S.254

⁵⁴ Vgl. Clausen; Geiger (2013), S. 254f.

3.2 Ladeeinheiten

Die meistgenutzte Ladeeinheit im kombinierten Verkehr sind Container. Auf Grund von erheblichen Vorteilen im Handling werden die Ladeeinheiten standardisiert, um so einen standardisierten Umschlag und den effizienten Einsatz von Transportmitteln gewährleisten zu können. Neben den Containern werden auch Wechselbehälter, Sattelaufleger sowie ganze LKW für den Transport von Waren verwendet.⁵⁵

ISO-Container

Mit der Einführung eines international standardisierten Containers, dem ISO-Container, gingen für den Transportsektor einige nennenswerte Vorteile einher. Der erste wesentliche Punkt ist die Zeitersparnis durch den standardisierten Umschlag, welcher mit einer gleichzeitigen Kostenersparnis im Umschlag einher geht. Der ISO-Container nach DIN ISO 668 wird vor allem als Überseecontainer verwendet, mit einer Größe von 10, 20, 30 und 40 Fuß und einem maximalen Gesamtgewicht von ca. 5, 10, 20 und 30t bietet er optimale Dimensionen für den internationalen Transport von Gütern. Der größte Nachteil dieser Container ist, dass dieser nicht für die Maße von Europaletten (0,8 x 1,20m bzw. 1 x 1,20m) ausgerichtet ist.⁵⁶

Auf der ganzen Welt gibt es heute 20 Millionen Container und jeder davon ist mit einer individuellen Kennzeichnung nach ISO-Norm ausgestattet. Ein Verkehrsträger, der großen Profit aus der Einführung der ISO-Container machte, ist der Eisenbahngüterverkehr. Durch die genormte Ladeeinheit konnten in kürzester Zeit große Mengen an Gütern transportiert werden. Diese werden mittels Ganzzug abgefertigt, deren Produktivität erheblich höher ist als die von Einzelwagen. Der Containerverkehr hat zu einer erheblichen Effizienzsteigerung im interkontinentalen Transport geführt und damit einhergehend den Welthandel revolutioniert.⁵⁷

Wechselbehälter

Im intermodalen Verkehr ist insbesondere der Umschlag zwischen Bahn und LKW wichtig, daher wurde der europäische Wechselbehälter gestaltet. Der Behälter ist 2,55m breit und 2,70 – 2,90m hoch. Theoretisch sollte ein Wechselbehälter perfekt sowohl für den Transport mittels LKW als auch mittels Bahn sein. Dennoch zeigte sich in

⁵⁵ Vgl. Klukas S. 9

⁵⁶ Vgl. Martin (2014) S. 69

⁵⁷ Vgl. Dr. Christoph Seidelmann (2010) S. 16, 18f.

der Praxis, dass dies nicht der Fall ist. Die Spediteure verlangen aus wirtschaftlichen Gründen, dass der Wechselbehälter innen gleich hoch ist wie ein LKW, dadurch ergibt sich eine Außenhöhe von 2,7 bis 3,2m. Das Hauptproblem dabei sind im internationalen Eisenbahnnetz die Tunneldurchfahrten. Vor allem in Großbritannien, Süd-Frankreich und Süd-Italien ist eine Durchfahrt mit solchen Wechselbehältern nicht möglich. Die Lösung für dieses Problem war es, alle Hauptverkehrsstrecken in Europa nach einem Mindest-Tunnelprofil klassifizieren zu lassen. Diese ist als Kodifizierung auf dem Wechselbehälter zu finden. Im Laufe dieses Prozesses wird der Behälter vermessen und gekennzeichnet. Diese Kodifizierung enthält daher genaue Informationen darüber, auf welchen Eisenbahnstrecken der jeweilige Wechselbehälter transportiert werden, darf.⁵⁸

Sattelaufleger

Neben den beiden bereits genannten Ladeeinheiten werden noch Sattelaufleger, für den Transport auf der Straße, verwendet. Eine Übersicht über die Verkehrsträger und ihre Relevanz für die verschiedenen Transportwege bietet folgende Abbildung (siehe Abbildung 10). Verschiedene Verkehrsträger sind abhängig von der Art des Transportes. Beispielsweise kann der Transport mittels RoLa (rollende Landstraße) nur über die Schiene erfolgen.⁵⁹

	Straße	Schiene	Wasser
Container	LKW- Chassis Gliederzug	2-achsiger Tragwagen 4-achsiger Tragwagen	Containerschiff Europaschiff Großmotorgüter- schiff
Wechselbehälter	LKW- Chassis Gliederzug	2-achsiger Tragwagen 4-achsiger Tragwagen	
Sattelaufleger	Sattelzug	Taschenwagen Wippenwagen	Roll-On Roll-Off Schiffe
RoLa		Niederflurwagen	

Abbildung 10: Verkehrsträger abhängig von Transportweg⁶⁰

⁵⁸ Vgl. Dr. Christoph Seidelmann (2010) S. 21f.

⁵⁹ Vgl. Clausen; Geiger (2013) S. 257f.

⁶⁰ Clausen; Geiger (2013) S. 258

3.3 Transportmittel

Der Transport auf der Schiene erfolgt einerseits über 2-achsige Tragwagen und andererseits über 4-achsige Tragwagen, hierbei handelt es sich ebenfalls um Flachwagen diese verfügen jedoch über ein Drehgestell. Dieses wird verwendet, um eine Sicherung der Container zu gewährleisten sie verfügen über Drehzapfen, sogenannten Twistlocks. Die genaue Arbeitsweise dieser wird in einem nachfolgenden Kapitel detailliert beschrieben.⁶¹

Auf der Straße werden Container und Wechselbehälter auf LKW-Chassis transportiert. Sattelaufleger werden mit Hilfe einer Sattelzugmaschine bewegt. Auf dem Wasser werden hauptsächlich Container transportiert. Die Kapazität eines dieser Schiffe wird in TEU angegeben und hebt sich von den Kapazitäten, welche an Land transportiert werden, erheblich ab.⁶²

3.4 K-V-Terminals

Für den Kombinierten Verkehr spielen Umschlagterminals eine sehr wichtige Rolle, da dort Ladeeinheiten von einem Verkehrsträger auf den nächsten umgeschlagen werden. Hierbei ist es wichtig, dass diese eine gute Anbindung aller genutzten Verkehrsträger bieten. Allerdings sind auch Aspekte wie eine ausreichend große Fläche für die Zwischenlagerung und eine genügend ausgestattete Straßen- und Eisenbahninfrastruktur bei der Wahl oder dem Bau eines K-V-Terminals essenziell. Ziel ist es, bei minimalen Betriebskosten eine maximale Umschlagskapazität zu erreichen.⁶³

Der Umschlag eines Containers läuft teilweise automatisiert ab, zunächst wird dieser von einem geeigneten Umschlaggerät aufgenommen. Dies funktioniert, da Container an den acht Ecken über ein zusätzliches würfelförmiges Werkstück mit ovalen Löchern am oberen Ende und an den zwei Außenseiten verfügen. Das Umschlaggerät ist mit einem teleskopierbaren Rahmen, auch bekannt als „Spreader“, ausgestattet. Dieser Rahmen enthält drehbare Zapfen („Twist Locks“), die in die Löcher der Eckbeschläge passen, die Zapfen werden anschließend um 90° gedreht. Durch diesen Vorgang ist der Rahmen des Umschlaggerätes fest mit dem Container verbunden. Die jeweilige Maschine kann den Container nun anheben und zu einem bestimmten Ort

⁶¹ Vgl. Clausen; Geiger (2013), S. 257f.

⁶² Vgl. Clausen; Geiger (2013), S.258

⁶³ Vgl. René Grassinger (), S.28f.

transportieren. Das Lösen des Containers vom Rahmen funktioniert nach dem gleichen Prinzip und dauert nur wenige Sekunden.⁶⁴

Wie bereits in einem vorhergehenden Absatz erwähnt, bedarf der kombinierte Verkehr dem Einsatz von speziellen Umschlagterminals. Die Prozesse, die an diesem durchgeführt werden, können unterschiedlich eingeteilt werden. Güter werden entweder per LKW oder per Zug angeliefert. Der Ankunftsprozess über die Straße erfordert zunächst eine Eingangskontrolle, wobei die Ladeeinheiten überprüft werden und die Transportdokumente abgelegt werden. Im weiteren Prozess unterscheidet man, zwischen LKW, die entladen werden und LKW, die beladen werden. Mittels Umschlaggeräten erfolgt der nächste Schritt. Ladeeinheiten werden sowohl von den Transportmitteln abgeladen als auch beladen. Die Wahl des zu wählenden Gerätes hängt von mehreren Faktoren ab. Nachdem der LKW oder der Zug bereit für den weiteren Transport außerhalb des Terminals ist, erfolgt der „Check-out“, dieser Prozess ist äquivalent zu dem Eingangsprozess.⁶⁵

Zusätzlich zu den Standardaufgaben an einem Umschlagterminal werden je nach Terminal noch zusätzliche Services angeboten. Wie zum Beispiel die Einlagerung von beladenen oder leeren Containern, Containerbegasung, Containerreparaturen oder LKW-Services.⁶⁶

Die folgende Abbildung (siehe Abbildung 11) zeigt schematisch den Prozess des kombinierten Verkehrs. In diesem Prozessschaubild ist der Transport mittels Straße-Schiene-Straße dargestellt. Die genaue Betrachtung der Prozesse innerhalb des K-V-Terminals wurde in dem vorhergehenden Absatz beschrieben.

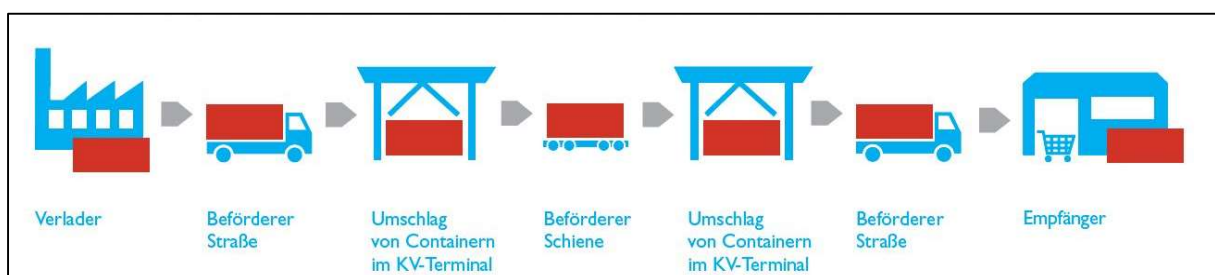


Abbildung 11: Prozessschaubild Kombiniertes Verkehr⁶⁷

⁶⁴ Vgl. Dr. Christoph Seidelmann (2010) S. 11f.

⁶⁵ Vgl. Jan Hildebrandt et al. (2014). S. 67, 70f., 83f.

⁶⁶ Vgl. Jan Hildebrandt et al. (2014) S. 86

⁶⁷ (2015).

Im Empfangsterminal werden Wechselbehälter oder Container von LKW-Fahrern abgeholt. Zunächst wird hier die Abholberechtigung geprüft, danach wird der Fahrer eingewiesen, wo sich seine Ladeeinheit befindet. Dieser stellt sich auf diesen Platz und wartet bis ein Kran die Ladeeinheit auf seinen LKW hebt. Nach einer anschließenden kurzen Überprüfung auf die Richtigkeit der Ladeeinheit öffnet sich die Ausfahrtsschranke und der LKW verlässt das Terminalgelände. Ein wesentliches Problem an Kombi-Terminals ist die Taktung der LKWs auf Grund unterschiedlicher und variierender Ankunfts- und Abfahrtszeiten, damit kein Fahrer warten muss. Dies ist eine herausfordernde Aufgabe, welche durch den steigenden Einsatz von Automatisierung immer besser bestritten werden kann.⁶⁸

An einem Kombi-Terminal unterscheidet man zwischen direktem und indirektem Umschlag. Wenn die Ladeeinheit ohne Unterbrechungen von dem Kran auf den Abhol-LKW umgeschlagen wird, spricht man von direktem Umschlag. Anders ist es beim indirekten Umschlag: in diesem Fall wird die Ladeeinheit per Kran vom Zug heruntergeladen und anschließend seitlich abgestellt oder von einem anderen Umschlaggerät auf einen Abstellplatz gefahren. Bei dem indirekten Umschlag ist für die Beladung des LKW ein weiteres Umschlaggerät erforderlich.⁶⁹

Bei der Betrachtung des schienenseitigen Transportes werden die Ladeeinheiten zunächst über das Ladegleis mit Hilfe einer Strecklok bewegt. Nach Abkoppelung der Strecklok kann diese das Terminal verlassen und die Wagen werden von der Rangierlok weitertransportiert. Nach mehreren Rangierbewegungen befinden sich die Wagen auf dem Ladegleis. Mit Ankunft dieser erfolgt die Eingangskontrolle und schließlich die Entladung.⁷⁰

3.4.1 Umschlaggeräte

Um Ladeeinheiten von einem Verkehrsträger auf einen anderen umschlagen zu können, werden spezielle Anlagen und Geräte benötigt. Diese unterscheiden sich bezüglich Größe, Gewicht und Anwendungsgebieten.

⁶⁸ Vgl. Dr. Christoph Seidelmann (2010) S. 49

⁶⁹ Vgl. Dr. Christoph Seidelmann (2010) S. 50

⁷⁰ Vgl. Clausen; Geiger (2013) S. 269f.

Kräne

Kräne können sich sowohl horizontal als auch vertikal bewegen, sie können Stück- oder Schüttgut umschlagen. In K-V-Terminals erfolgt der Umschlag mittels Kran meist vertikal. Hierfür werden Brücken- oder Portalkräne eingesetzt. Der Portalkran ist in den meisten Fällen an Schienen gebunden („Rail mounted gantry crane“) und kann nur innerhalb eines begrenzten Bereiches arbeiten. Dieser wird für den Umschlag von Gütern von der Straße auf die Schiene und umgekehrt genutzt. Der Brückenkran wird zur Stapelung von Containern in Lagerhallen gebraucht. Dort werden Ladeeinheiten zwischenzeitlich gelagert.⁷¹

Neben den schienengebundenen Kränen gibt es diese auch als gummibereifte Portalkräne („Rubber tyred gantry cranes“). Hierbei gibt es unterschiedliche Höhen, Breiten, Spannweiten und Gewichte, zwischen denen man unterscheiden kann.⁷²

Der Antrieb von Portalkränen, die in Containerterminals eingesetzt werden, variiert zwischen Diesel-, Hybrid- oder vollelektrischem Antrieb. Zu dem gibt es in Zukunft auch die Möglichkeit Kräne in vollautomatisierten Betrieb einzusetzen.⁷³

Abbildung 12 zeigt einen Portalkran in einem Umschlagterminal.

⁷¹ Vgl. Kuhlmann (2013) S. 27ff.

⁷² Vgl. Jan Hildebrandt et al. (2014) S. 71

⁷³ Vgl. Konecranes Deutschland (2022)



Abbildung 12: Portalkran in einem Umschlagterminal⁷⁴

Leercontainerstapler

Der Transport von Ladeeinheiten geschieht mit Hilfe von Portalstaplern (Van Carrier) oder Reach Stackern (Portalhubwagen).⁷⁵ Man unterscheidet zwischen dem Transport eines leeren Containers und eines beladenen Containers. Beladene Container können nur quer aufgenommen werden, wohingegen leere Container an der Stirnseite, von oben und längs angehoben werden können.⁷⁶

Der am meisten eingesetzte Leercontainerstapler ist der Containerstapler, dieser ähnelt einem großen Gabelstapler. Je nach Hubleistung können auch beladene Container transportiert werden, jedoch erfolgt der Einsatz dieser Geräte nur bei einer kleinen Zahl an umgeschlagenen TEU.⁷⁷

⁷⁴ kombiverkehr.de (2023).

⁷⁵ Vgl. René Grassinger (). S.30

⁷⁶ Vgl. Martin (2006) S. 295

⁷⁷ Vgl. Clausen; Geiger (2013) S. 266

Reach Stacker

Der Reach Stacker (in Abbildung 13 ersichtlich) wird häufig dazu verwendet, um Leercontainer in Depots zu stapeln aber auch zur Beladung von LKW und Bahn. Dieser verfügt über einen teleskopierbaren Arm, welcher es ihm ermöglicht bis zu sechs Container aufeinander zu stapeln. Dieses Umschlaggerät bietet eine hohe Flexibilität und wird vor allem in kleinen und mittleren Terminals eingesetzt, da die Hubleistung von 10 bis 45t auch für beladene Container ausreichend groß ist. Ein großer Vorteil dieses Flurfördermittels ist seine Wendigkeit, daher wird dieses in Terminals mit kurzen Transportwegen und einer hohen Anzahl an Ein- und Auslagerungen eingesetzt.⁷⁸

Reach Stacker werden meist von einem Dieselmotor angetrieben jedoch gibt es auch hier schon neue Entwicklungen. So hat Konecranes, ein etablierter Hersteller für industrielle Umschlaggeräte, den ersten Reach Stacker mit hybridem Antrieb auf den Markt gebracht und verspricht damit eine erhebliche Reduktion der entstandenen CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauches um mindestens 30 Prozent.⁷⁹



Abbildung 13: Reach Stacker SANY Group⁸⁰

⁷⁸ Vgl. Clausen; Geiger (2013) S.265

⁷⁹ Vgl. Konecranes Deutschland (2013)

⁸⁰ SANY (2023)

Neben dem Reach Stacker kommt noch der sogenannte Van Carrier beim Umschlag zum Einsatz. Diese können bis zu zwei Container hoch stapeln und werden heutzutage bereits vollautomatisiert betrieben.⁸¹

Konecranes bietet einen Straddle Carrier (äquivalent zu Van Carrier) an, welcher in den zwei Antriebsarten diesel-hydraulisch und diesel-elektrisch zu erhalten ist.⁸²

Radlader

Für den Umschlag von Schüttgut werden in einigen Terminals Radlader eingesetzt. Diese leistungsstarken Maschinen können in vielen Bereichen Anwendung finden. Der Antrieb erfolgt durch Dieselmotoren.⁸³

3.5 Herausforderungen im Kombinierten Verkehr

Da der Hauptteil des Transportes von Gütern auf der Schiene stattfindet, muss man hierbei einige Punkte beachten. In einigen europäischen Ländern haben die Eisenbahnnetze andere Spurweiten. Beispielsweise müssen an der französisch-spanischen Grenze die Ladeeinheiten umgelagert werden, da die Spurweite in Spanien eine andere ist als in Frankreich. In Spanien ist zudem die maximale Zuglänge kürzer, daher müssen Zugladungen an der Grenze getrennt werden. Ein weiterer Aspekt sind die Oberleitungen, diese werden für die elektrische Traktion gebraucht und verfügen je nach Land über unterschiedliche Stromspannungen und Wechselstromfrequenzen. Aufgabe der Europäischen Union ist es, diese Defizite in den Ländern zu beseitigen, um so einen optimalen Standard zu liefern.⁸⁴

Kern des kombinierten Verkehrs sind die Umschlagterminals, die Errichtung dieser ist mit hohen Kosten verbunden. Dadurch beschränkt sich die Anzahl auf ein Minimum, dies bringt für die Kunden jedoch erhebliche Nachteile, wie beispielsweise mangelnde Flexibilität.⁸⁵

Der Erfolg des Kombinierten Verkehrs ist stark abhängig von dem Eisenbahnsektor und dessen Entwicklung. Dieser konnte seinen Marktanteil leicht ausbauen und auch die Verkehrsleistung wuchs innerhalb der letzten Jahre. Von Seiten der Politik bekommt der Bahnsektor viel Zuspruch und große Unterstützung. Jedoch zeigt sich, dass der

⁸¹ Vgl. Martin (2006) S. 296

⁸² Vgl. Konecranes Deutschland (2023)

⁸³ Vgl. (2023d)

⁸⁴ Vgl. Dr. Christoph Seidelmann (2010) S.41

⁸⁵ Vgl. Kuhlmann (2013) S. 33

Bahnverkehr an seine Kapazitätsgrenze gelangt. Die gewählten Bahnstrecken für den Kombinierten Verkehr bestehen aus den Hauptverkehrsrouten, diese sind wiederum bereits durch den Personenverkehr ausgelastet, was bei einem höheren Aufkommen zu gravierenden Problemen führen kann. Durch eine bessere Nutzung der Infrastruktur mittels Digitalisierung können die Auswirkungen auf die Kapazität begrenzt werden. Eine wirksame Lösung für dieses Problem stellen nur erhebliche Investitionen, seitens der Politik, in die Infrastruktur dar. Diese Weiterentwicklung wird zudem durch immer strengere Regelwerke erschwert.⁸⁶

Im innereuropäischen Raum wird das erhöhte Warenaufkommen mittels Straße und Schiene bedient. Nun muss auch im Bereich des kombinierten Verkehrs diese erhöhte Kapazität abgefertigt werden. Dafür müssen laufend Änderungen in der Infrastruktur stattfinden. Terminals, Gleisverbindungen, Straßenanbindungen dies sind unter anderem Teile der Infrastruktur, die benötigt werden. Hauptproblem hierbei ist die Klärung der Zuständigkeit: Wer ist verantwortlich für diese Veränderungen? In den meisten Ländern wurde diese Problematik bereits früh erkannt und nach einer Lösung gesucht. So wurden in Zuge dessen spezielle Abteilungen oder Förderprogramme ins Leben gerufen.⁸⁷

3.6 Vorteile des Kombinierten Verkehrs

Neben den bereits genannten Vorteilen wie die Entlastung der Straßen, erhöhte Sicherheit und Reduktion der Emissionen, gibt es auch einige ökonomische Vorteile, die für Unternehmen eine hohe Bedeutung haben können. Durch den Entfall des Verkehrsträgers auf der Straße entsteht keine KFZ-Steuer mehr und auch die Mautkosten werden erheblich minimiert. Fahrverbote, die für LKW verpflichtend sind, entfallen auf der Schiene. Im reinen Straßenverkehr dürfen LKW ein zulässiges Gesamtgewicht von 40 Tonnen aufweisen, LKW, die im Vor- oder Nachlauf des kombinierten Verkehrs eingesetzt werden, dürfen ein Gesamtgewicht von bis zu 44 Tonnen haben.⁸⁸

3.7 Emissionen in Intermodalterminals

Beim Transport von Gütern wird Energie verbraucht, meist wird diese dadurch gewonnen, dass fossile Brennstoffe verbrannt werden. Die dabei freigesetzte Energie

⁸⁶ Vgl. Böttger (2020). S. 194

⁸⁷ Vgl. Dr. Christoph Seidelmann (2010) S. 72

⁸⁸ Vgl. Achim Klukas et al. (2019) S. 11f.

wird für den Antrieb verwendet, dabei wird unter anderem Kohlendioxid (CO₂) freigesetzt. In den letzten Jahren wurden jedoch Themen wie die Klimakrise immer öfters aufgebracht und daher auch die zunehmenden Emissionen, die durch den wachsenden Warentransport entstehen. Der kombinierte Verkehr bietet hierfür eine sehr gute Lösung, da der klimaschädliche Straßenverkehr über weite Strecken hinweg vermieden wird. Ein weiterer Beitrag zur nachhaltigen Energieeinsparung bietet der Schienenverkehr. Ein Blockzug der eine Nutzlast von 800 bis 1200t transportiert braucht erheblich weniger Energie als äquivalent dazu 40 LKW mit je 20 bis 25t Nutzlast. Dies liegt unter anderem daran, dass der Rollwiderstand der Schiene auf den Gleisen geringer ist als der des LKW-Reifens auf der Straße. Während die meisten LKW noch von Diesel-Motoren angetrieben werden, sind große Teile des Schienennetzes bereits elektrifiziert. Diese Energie stammt für den Betrieb in Österreich und in der Schweiz beispielsweise vollständig aus erneuerbaren Energien. Dies ist von Land zu Land verschieden, im europäischen Schnitt liegt die CO₂ Einsparung jedoch bei 60%. Durch den vermehrten Einsatz von erneuerbaren Energien könnte der CO₂ Ausstoß in Zukunft fast bei „Null“ liegen.⁸⁹

Um die Emissionen, die auf einem Intermodal Terminal entstehen berechnen zu können, müssen alle Prozesse betrachtet werden nicht nur die reinen eingehenden und ausgehenden Transportflüsse. Neben den Transportprozessen am Terminal müssen auch zusätzliche Serviceangebote betrachtet werden. Beispielsweise die Einlagerung von Containern insbesondere gekühlten Containern, welche einen hohen zusätzlichen Energieverbrauch aufweisen. Die Grenzen aufzustellen, welche Transportwege dem Terminal zugerechnet werden und welche nicht stellt sich als äußerst schwierig heraus und ist hauptsächlich abhängig von den geplanten Ergebnissen, die ermittelt werden sollen.⁹⁰

⁸⁹ Vgl. Dr. Christoph Seidelmann (2010) S. 62ff.

⁹⁰ Vgl. Jan Hildebrandt et al. (2014) S. 52f.

4 Systematische Literaturrecherche zur Berechnung und Modellierung von Emissionen in Intermodalterminals

In diesem Kapitel werden das Vorgehen, die Analyse und die Ergebnisse der Literaturrecherche vorgestellt.

4.1 Methodik

In dieser Arbeit wurde auf die Forschungsmethodik der systematischen Literaturrecherche (SLR) zurückgegriffen. Hierbei werden Studien systematisch gefunden, selektiert und analysiert. Als wissenschaftliche Datenbank wurde zu Beginn Scopus gewählt und als erster Schritt wurde ein Suchbegriff definiert, der in Tabelle 2 dargestellt ist. Andere Datenbanken wurden als irrelevant eingestuft, da diese keine signifikanten Unterschiede in den Ergebnissen lieferten. Die Einschränkung des Jahres wurde auf Literatur beschränkt, die ab 2016 veröffentlicht wurde.⁹¹

Tabelle 2: Suchkriterien

	UND	UND	UND
OR	co2	terminal	evaluation
OR	„carbon emission“	„road-rail“	calculation
OR	„greenhouse emissions“	gas Port	„carbon assessment“
OR	„carbon footprint“		simulation

Die Suche, Auswahl und Analyse der Studien wurde gemäß den PRISMA-Leitlinien zur Durchführung systematischer Literaturrecherchen dokumentiert und ist in Abbildung 14 dargestellt.⁹² In Summe wurden 352 Arbeiten identifiziert, welche anschließend einem ersten Screening unterzogen wurden. Im ersten Schritt wurden der Titel und das Abstract betrachtet, danach wurde anhand der relevanten Literatur eine Volltextprüfung durchgeführt. Die Relevanz einer Arbeit wurde dabei nach folgenden Kriterien bewertet: Artikel, die nicht den Bereich des intermodalen Transportes

⁹¹ Vgl. Miklautsch; Woschank (2022). S. 4

⁹² Vgl. Page et al. (2021a)

behandeln oder detaillierte Modellierungen und Simulationen beinhalten, wurden nicht in die weiteren Analysen einbezogen.

Nach diesem ersten Screening wurden 32 Arbeiten identifiziert, welche einer weiteren Analyse unterzogen wurden. Von diesen 32 Arbeiten konnten 8 nicht gefunden werden, so dass schließlich bei 24 Arbeiten eine Volltextanalyse durchgeführt wurde. An diesem Punkt sei erwähnt, dass sich die Anzahl der Arbeiten um eine reduziert hat, da sich am Beginn der Analyse herausstellte, dass es sich bei zwei Arbeiten um Duplikate handelt. Weiters wurden Forschungsarbeiten entfernt, die reine Simulationen hervorbrachten oder keine verwertbaren Informationen lieferten.

In dieser letzten Phase wurde zudem eine Rückwärtssuche durchgeführt, die 7 Forschungsarbeiten lieferte, welche den Kriterien entsprachen. Davon wurden 5 Arbeiten als relevant herangezogen.

Die Methodik wurde angelehnt an aktuelle Studien, die in peer-reviewten wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht wurden.⁹³

⁹³ Vgl. Miklautsch; Woschank (2022) S. 4f.; Thomas Nordhausen; Julian Hirt (2020).

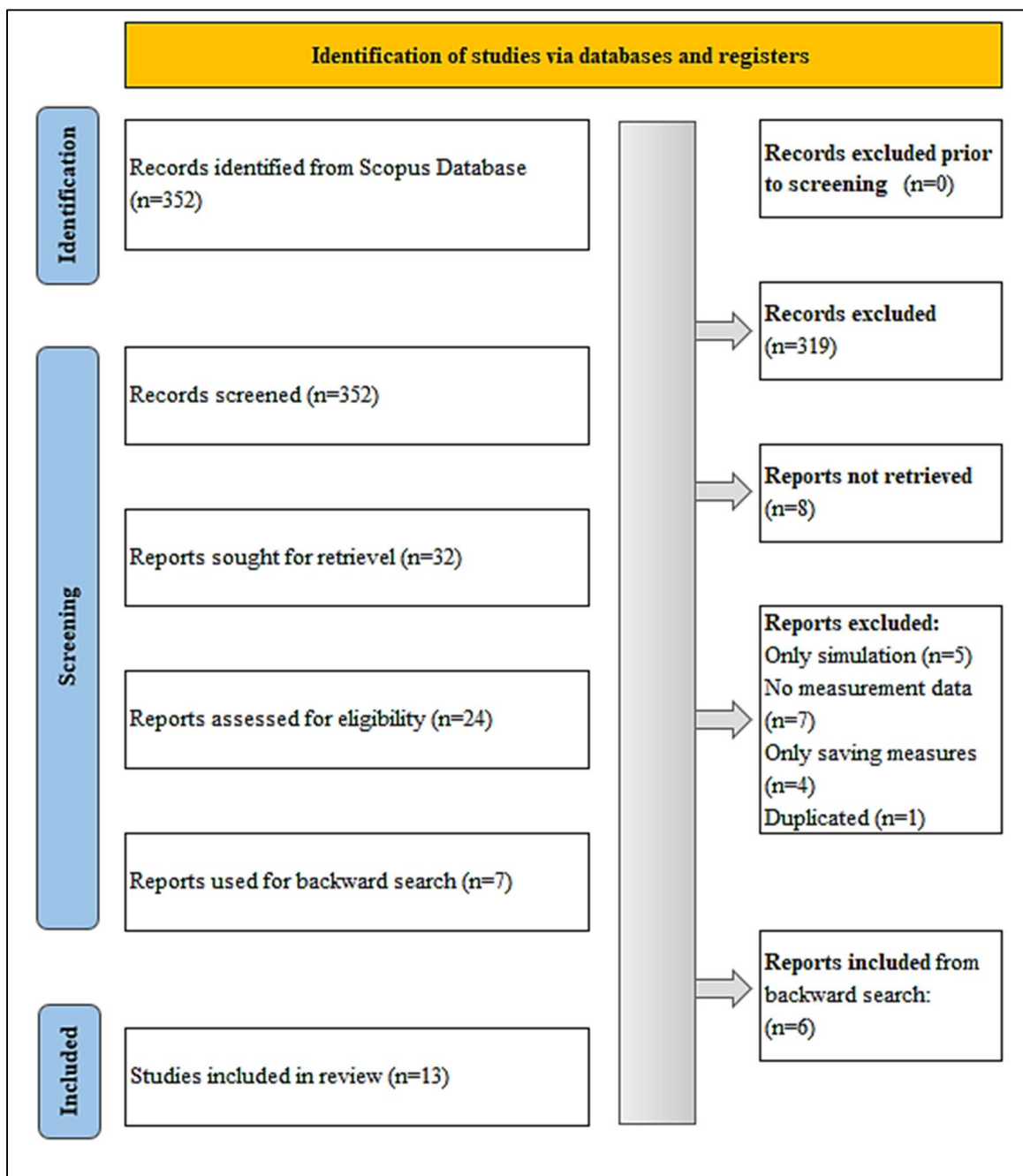


Abbildung 14: Leicht modifizierter Auswahlprozess relevanter Studien nach PRISMA⁹⁴

4.2 Deskriptive Analyse

Die Analyse der Verteilung der Dokumenttypen brachte hervor, dass es sich bei fast allen gefundenen Arbeiten um Zeitschriftenartikel handelt. Lediglich im Laufe der Rückwärtssuche wurde ein Buchkapitel gefunden. Folgende Erkenntnisse sind in Abbildung 15 ersichtlich.

⁹⁴ Vgl. Page et al. (2021b).

Nun wurden die Studien nach relevanten Themen gruppiert. Dabei stellte sich heraus, dass in 12 von 13 Studien der Hafen und die dazugehörigen Prozesse untersucht werden. In einem Dokument werden intermodale Transporte auf der Straße bzw. Schiene betrachtet. Bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass sich alle verfassten Arbeiten mit den Umschlagsoperationen an den Terminals befassen. Es gibt unterschiedliche Spezialisierungen, wie der Fokus auf interne LKW, speziellen Anlagen für den Containerumschlag oder die Schiffsankunft- bzw. abfahrt.

Zur Ermittlung der Ergebnisse wurden unterschiedliche Methoden angewandt, unter anderem wurden in sechs Studien bestehende Modelle diskutiert oder neue Simulationen entwickelt. In einer Arbeit wurde ein Software Tool entwickelt und vorgestellt, zur detaillierten Berechnung der CO₂-Emissionen, die von den Umschlagsgeräten am Hafen verursacht werden. In fünf Studien wurden verschiedene Methoden vorgestellt, wie CO₂-Emissionen von Geräten und Fahrzeugen berechnet werden können. Eine Arbeit hat sich damit beschäftigt die entstandenen Emissionen gemäß den geltenden Normen zu berechnen und analysieren.

Als Ergebnis wurden entworfene Modelle, Werte für CO₂-Emissionen oder Einsparungsmaßnahmen vorgestellt. Letztere wurden in sechs Studien erläutert. Im Laufe der Recherche zeigte sich zudem, dass kaum Forschungsarbeiten vorhanden sind, die eine tatsächliche Entwicklung eines Tools für die CO₂-Emissionsberechnung hervorbringen.

Weiters wurden die Arbeiten nach ihrem Veröffentlichungsjahr gruppiert, siehe Abbildung 16. Hierbei ging hervor, dass insbesondere die Studien, die durch die Rückwärtssuche gefunden wurden, bereits vor einigen Jahren veröffentlicht wurden. Dabei zeigt sich ein klarer Trend im Jahr 2013. Die Studien, die sich aus der direkten Literaturrecherche ergaben, verteilen sich gleichmäßig über die Jahre 2017 bis 2022. Hierbei sei noch erwähnt, dass für die Rückwärtssuche keine explizite Eingrenzung in Hinsicht auf das Veröffentlichungsjahr gemacht wurde.

Zuletzt wurde die Zahl der Autoren betrachtet, wie in Abbildung 17 zu sehen ist. Daraus ergab sich, dass die meisten Studien von Dreiergruppen verfasst wurden. Allein ein

kaum signifikanter Anteil der Arbeiten wurden von einer Person oder Vierergruppen niedergelegt.

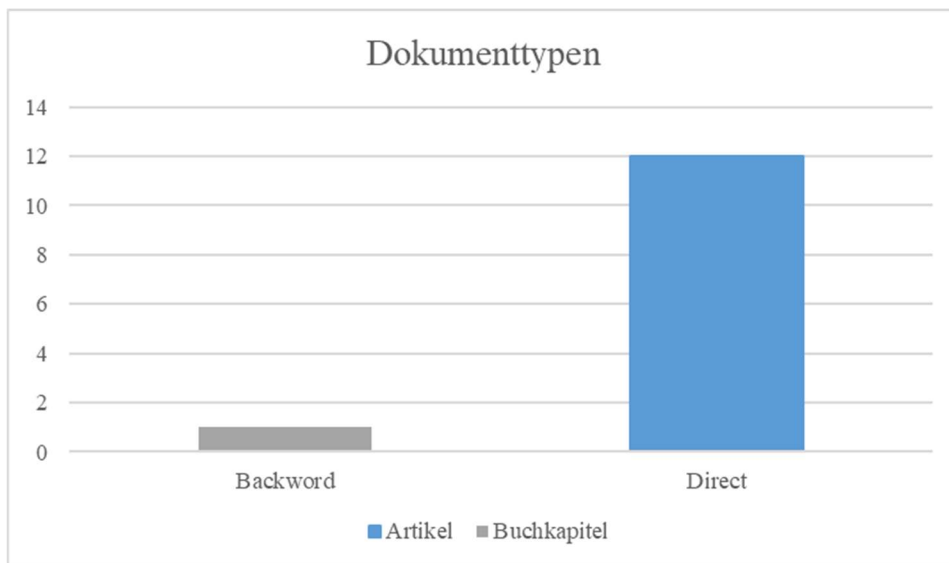


Abbildung 15: Deskriptive Analyse der Dokumenttypen

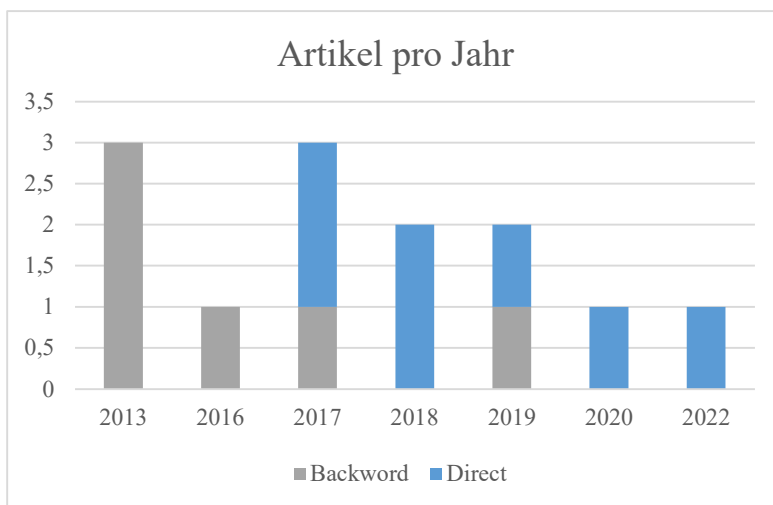


Abbildung 16: Deskriptive Analyse der Veröffentlichungsjahre

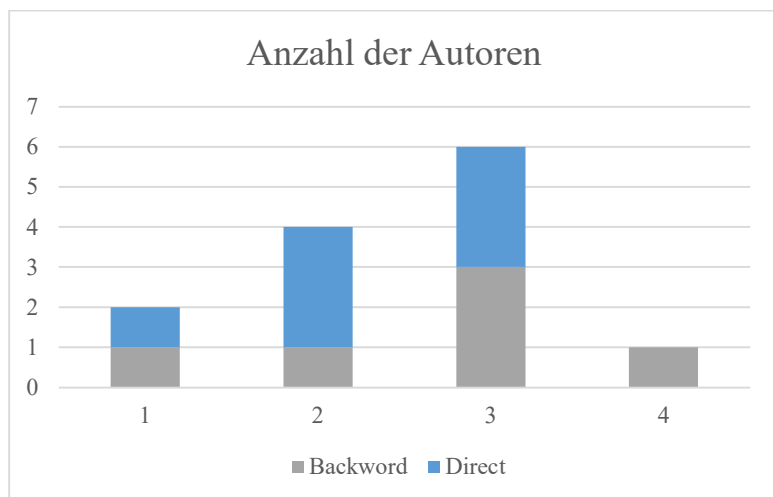


Abbildung 17: Deskriptive Analyse der Anzahl der Autoren

4.3 Inhaltsanalyse und Ergebnisse

Im Rahmen der Volltextanalyse zeigte sich, dass die größte Entwicklung bei der Erhebung und Bewertung von Emissionen in Häfen stattfindet. Eine Übersicht aller relevanten Werke findet sich in Tabelle 3 wider.

Bis auf eine Arbeit handelt es sich bei allen untersuchten Terminals um Hafenterminals. Bei genauerer Betrachtung unterscheiden sich die speziellen Untersuchungsbereiche, wobei auch hier zum Großteil Umschlagsoperationen betrachtet werden. Als bevorzugte Methoden stellten sich Erstellung eines Modells/Simulation/Tool oder die Berechnung der CO₂-Emissionen heraus. Neben der Erstellung einer CO₂-Bilanz wurden meist mögliche Einsparungsmaßnahmen vorgestellt und diskutiert. Lediglich in einer betrachteten Arbeit wurde ein Softwaretool zur Berechnung der Emissionen an einem Terminal erstellt.

Tabelle 3: Inhaltsanalyse

Titel	Untersuchungsbereich	Spezialisierung	Methode	Ergebnisse
Sim (218)	Hafen	Umschlagsoperationen	Simulation	CO ₂ -Emissionen und Einsparungsmaßnahmen
Bottani (2017)	Hafen	Interne LKW	Simulation	Modell

Azarkamand et al. (2020)	Hafen	Umschlagsoperationen	Standards/Normen	Software/Tool
Saharidis; Konstantzos (2018)	Hafen	Interne LKW	Diskussion bestehender Modelle	Bewertung der Modelle
(Konstantzos et al. (2017)	Hafen	Umschlagsoperationen	Bestehendes Modell (COPERT)	Erweiterungen und wichtige Ansätze bei Verbesserung des bestehenden Modells
Budiyanto et al. (2019)	Hafen	Umschlagsoperationen	Modell (ideale Bedingungen)	CO2-Emissionen
Botana et al. (2023)	Hafen	Umschlagsoperationen	Software Tool	Einsparungsmaßnahmen
Martínez-Moya et al. (2019)	Hafen	Umschlagsoperationen	Berechnung der CO2-Emissionen	Einsparungsmaßnahmen
Craig et al. (2013)	Intermodal Terminal	Transporte von Straße auf Schiene verlagern	Berechnung der CO2-Emissionen	Möglichkeit zur Berechnung der Einsparungen
Yang (2017)	Hafen	Umschlagsoperationen	Berechnung der CO2-Emissionen	Einsparungsmaßnahmen
Yang; Lin (2013)	Hafen	Anlagen für den Containerumschlag	Berechnung der CO2-Emissionen	Einsatz elektrischer Anlagen am effizientesten
Chang et al. (2013)	Hafen	Schiffsankunft bzw. -abfahrt	Verbrauch und CO2-Emissionen der	CO2-Emissionen

			verschiedene n Schiffe	
Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic (2016)	Hafen	Umschlagsoperationen	Simulation	Genauere Herangehensweise, CO ₂ -Emissionen

In Bezug auf die Relevanz der betrachteten Literatur zu diesem Thema zeigte sich, dass lediglich ein paar Punkte in die Entwicklung aufgenommen werden konnten. Sämtliche Einsparungsmaßnahmen wurden im Laufe dieser Arbeit vernachlässigt und daher nicht betrachtet. Arbeiten, in denen Modelle diskutiert bzw. erstellt wurden lieferten wertvolle Ansätze zur Entwicklung des Tools.

Besonders aufgefallen ist die Methode der Simulation von Abläufen in Intermodalterminals, eine selektive Auswahl von Studien und deren Ergebnissen dazu, finden sich in dem folgenden Abschnitt wieder.

Studie 1 (Sim (2018)) verwendet verschiedene Methoden der Simulation, um Ergebnisse zu erzielen. Es wurde eine Simulation mit Hilfe von System Dynamics durchgeführt, um eine Sensitivitätsanalyse zu erhalten. Für die Darstellung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen den system-dynamischen Modellparametern der Umschlagsprozesse von Containern auf dem Terminal wurde ein Kausalschleifendiagramm herangezogen. Anschließend wurde ein Bestands- und Flussdiagramm zur Bewertung der CO₂-Emissionen mit Hilfe einer Software entworfen.⁹⁵ Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass das Bewegen der Containerschiffe und das Be- und Entladen dieser 51,13% und 37,34% der gesamten CO₂-Emissionen des Containerterminals ergeben. Die Annahme und Auslieferung der Container, der Transport dieser und der Prozess der Schiffe am Liegeplatz verursachen 9,92%, 1,04% und 0,57%.⁹⁶

In Studie 2 (Bottani (2017)) hingegen wurde ein Flussdiagramm entworfen, welches die Prozesse im Containerterminal darstellt. Auf Basis dessen konnten Daten in die, für die Simulation verwendete Software Simio eingegeben werden. Das Modell verwendet

⁹⁵ Vgl. Sim (2018) S. 529

⁹⁶ Vgl. Sim (2018) S. 532

verschiedene Arten der Simulation, wie unter anderem Ereignis-, Prozess-, Objekt-, Systemdynamik- und Agentenmodellierung. In dieser Studie wurden keine expliziten Ergebnisse veröffentlicht, lediglich die Beschreibung der Vorgehensweise der Simulation. Studie 2 behandelt ausschließlich Umschlagsprozesse am Terminal.⁹⁷

Eine dritte Studie (Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic (2016)) diskutiert die Ermittlung der CO₂-Emissionen in multimodalen Containerterminals. Die Grundlage bietet ein bereits entworfenes Excel-Tool. Dieses wird mit Hilfe eines Simulationsmodells erweitert, dadurch können Umschlagsprozesse genau wiedergegeben werden und die GHG-Emissionen für jede Ladeinheit exakt berechnet werden.⁹⁸ Die Ergebnisse zeigen, dass die berechneten Emissionswerte den Erfahrungen der beteiligten Terminalbetreiber entsprechen. Es wurde gezeigt, dass der Einfluss der zurückgelegten Strecke auf den Gesamtenergieverbrauch eines Kranzyklus etwas höher ist als der Einfluss des Containergewichts.⁹⁹

Alle drei Studien setzten Simulation ein, um Umschlagsprozesse am Hafen darzustellen und genaue Ergebnisse zu den CO₂-Emissionen zu erhalten. Die daraus gewonnenen Ergebnisse unterscheiden sich im Betrachtungsbereich.

⁹⁷ Vgl. Bottani (2017) S. 77ff.

⁹⁸ Vgl. Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic (2016) S. 177f.

⁹⁹ Vgl. Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic (2016) S. 187

5 Entwicklung eines Berechnungsmodells

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen „KombiConsult GmbH“, sesshaft in Frankfurt am Main, ein CO₂-Bilanzierungstool für Intermodalterminals erstellt. Hierbei handelt es sich um ein Excel Dokument, mit welchem angegebene Energieverbräuche in CO₂-Emissionen umgerechnet werden können und auf die umgeschlagenen Ladeeinheiten bezogen werden. In nachfolgendem Kapitel wird die Entwicklung dieses Tools näher betrachtet und das Berechnungsmodell im Detail vorgestellt.

5.1 Vorbereitung

Im Rahmen der Zusammenarbeit wurde ein Tool in Microsoft Excel entwickelt. Ziel war es ein Modell zu erstellen, in dem man verschiedene Eingabeparameter hinzufügt und anschließend eine CO₂-Bilanzierung durchgeführt wird. Die im vorhergehenden Kapitel präsentierte Literaturrecherche dient als theoretische Basis für die Entwicklung des Tools.

Bei der Entwicklung des Modells, wurde auf die Vorgaben geltender Normen und Standards geachtet. Die in diesem Bereich gültigen Normen sind die DIN EN 16258 und die EN ISO 14083. Um die Einhaltung der Normen zu gewährleisten wurden alle Umrechnungen, Emissionsfaktoren und Berechnungsgrundlagen bezüglich der geltenden Anforderungen ausgewählt.¹⁰⁰

5.2 Prozess der Entwicklung in Microsoft Excel

Für die Erstellung des Tools wurde die Plattform Microsoft Excel gewählt, da diese eine bekannte Oberfläche, einfache Handhabung und vollständige Umsetzung der CO₂-Berechnung ermöglicht. Die leichte Zugänglichkeit aber auch das allgemeine Verständnis für die Funktionen von Excel, überzeugten.

Die Berechnungen des Tools basieren auf einer Richtlinie zur CO₂-Berechnung in Logistikzentren von Fraunhofer IML, jedoch mussten einige Aspekte geändert bzw. erweitert werden, um eine Berechnung mit den Funktionen, die Microsoft Excel zu bieten hat, durchführen zu können. Änderungen und Anpassungen, die vorgenommen wurden, werden in Kapitel 5.4 diskutiert. Um zu den gewünschten Ergebnissen zu gelangen, wurde auf das in Microsoft Excel inkludierte Tool „Power Query“ zurückgegriffen. Dies wird verwendet, um Tabellen zusammenzuführen und

¹⁰⁰ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (ON) (2022); Austrian Standards International (2013).

geeignete Abfragen generieren zu können. Dadurch wird die Berechnung wesentlich effizienter und robuster.

Die Eingabe der Daten erfordert zu Beginn eine klare Einteilung der Prozesse, Frachttypen und Anforderungen. Nach diesem Schritt müssen die Energieverbraucher angegeben werden, daraufhin wird die Berechnung gestartet. Die Einteilung der Prozesse, Frachttypen und Anforderungen erfolgt gemäß der Logik, welche in nachfolgend diskutiert wird.

5.3 Berechnungslogik nach Fraunhofer

Fraunhofer IML entwickelte einen Guide um GHG-Emissionen, die an Logistikstandorten entstehen, berechnen zu können. Der entworfene Leitfaden ist generisch und kann leicht adaptiert werden. Der Guide bietet zwei Arten zur Berechnung an. Zunächst wird eine top-down Berechnung der durchschnittlichen Emissionen vorgestellt und im Anschluss eine bottom-up Berechnung der Emissionsintensitäten auf Basis von sogenannten „Activity levels“. Im Zuge dieser Arbeit wurde letztere Methode verwendet, welche im folgenden Abschnitt vorgestellt wird. Zudem wird in dem Guide beschrieben, wie man die berechneten Emissionswerte nutzen und interpretieren kann.¹⁰¹

Die Basis der bottom-up Berechnung von Fraunhofer ist die Unterteilung der Aktivitäten eines Logistikstandorts in „Activity levels“. Sämtliche Tätigkeiten, die am Terminal ausgeübt werden und Energie verbrauchen, werden unterteilt, um eine genaue Auflistung der Emissionen zu erhalten. Diese Aktivitätslevel sollten bewusst gewählt werden, da sie in weiterer Folge den Energieverbrauchern zugeteilt werden müssen.¹⁰²

Diese Art der Zuteilung erfordert genaue Daten, das Unternehmen beziehungsweise der Terminal muss eine Auflistung aller Mengen an verbrauchter Elektrizität und Treibstoff (= sämtliche Energieträger) erstellen. Dies kann wie folgt aussehen:

- Dieserverbrauch von Fahrzeugen und dem Bedienen von technischen Geräten
- Strom für die Beleuchtung der Außenflächen
- Strom für Betrieb der Kühl- oder Heizungsanlage
- Strom für IT-Systeme, Verwaltung, Werkstätten
- Dieserverbrauch von Generatoren

¹⁰¹ Vgl. Kerstin Dobers et al. (2019) S. 10f.

¹⁰² Vgl. Kerstin Dobers et al. (2019) S. 15

- Strom für Wiegestationen, Verpackungsmaschinen, Müllpressen usw.¹⁰³

Nun muss die Zuweisung der Energieverbraucher zu den Prozessen erfolgen. Laut Fraunhofer IML kann ein Energieverbraucher mehreren Prozessen zugerechnet werden.¹⁰⁴

Zur Berechnung der unterschiedlichen Emissionsintensitätswerte muss das Unternehmen die Menge der ausgehenden Ladeinheiten erfassen. Neben der Gesamtmenge sollte das Unternehmen auch über Teilmengen verfügen, wenn es Ladeinheiten gibt, die unterschiedliche Aktivitäten im Terminal durchlaufen, sollten diese dementsprechend aufgeteilt werden. Wenn es Ladeinheiten mit signifikantem Mehraufwand bzw. zusätzlich benötigten Prozessen gibt, müssen diese separat betrachtet werden. Dies wird nur gemacht, wenn für diese zusätzlichen Prozesse auch Energieverbrauchsdaten vorliegen.¹⁰⁵

Zur Veranschaulichung wird nun in Abbildung 18 ein ausgewähltes Beispiel aus dem Guide beschrieben.

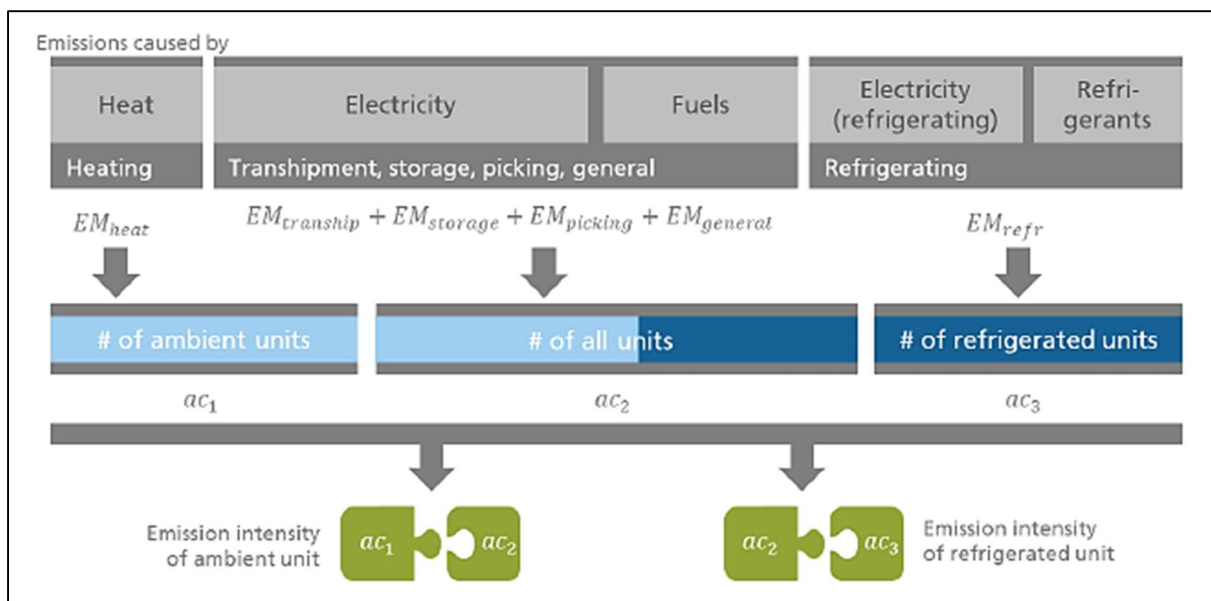


Abbildung 18: Beispiel Fraunhofer¹⁰⁶

Dieses Beispiel zeigt ein System aus gekühlten und gewärmten Ladeinheiten. Energieverbraucher sind in diesem Beispiel die Wärmeerzeugung (Aktivitätskategorie „heating“), die Kühlung (Aktivitätskategorie „Refrigerating“) sowie die allgemeinen

¹⁰³ Vgl. Kerstin Dobers et al. (2019) S. 28

¹⁰⁴ Vgl. Kerstin Dobers et al. (2019) S. 28

¹⁰⁵ Vgl. Kerstin Dobers et al. (2019) S. 15, 42

¹⁰⁶ Kerstin Dobers et al. (2019) S. 41

Terminaloperationen (Aktivitätskategorie „Transshipment, storage, picking, general“). Da es zwei Arten von Ladeeinheiten, mit unterschiedlichen Anforderungen an den Energieverbrauch gibt, werden die Ladeeinheiten in "ambient units" (temperierte/gewärmte Ladeeinheiten) und „refrigerated units“ (gekühlte Ladeeinheiten) unterteilt. Die Emissionen aus der Wärmeerzeugung werden rein den ersten Ladeeinheiten – die aus der Kühlung rein den zweiten – zugeordnet. Die Emissionen aus den allgemeinen Transportoperationen müssen indes gleichmäßig auf alle Ladeeinheiten verteilt werden.¹⁰⁷

Heating of units	$ac_1 = \frac{EM_{heat}}{Q_{units,amb}}$
Handling of units	$ac_2 = \frac{EM_{rest}}{Q_{units,amb} + Q_{units,refr}}$
Refrigerating of units	$ac_3 = \frac{EM_{refr}}{Q_{units,refr}}$
ac_1	Allocation coefficient for heating of units [kg CO ₂ e/tonne]
ac_2	Allocation coefficient for all other processes at the site [kg CO ₂ e/tonne]
ac_3	Allocation coefficient for refrigerating of units [kg CO ₂ e/tonne]
$EM_{partial}$	Partial emissions [kg CO ₂ e] i.e. heating, rest or refrigerating
$Q_{units,amb}$	Amount of ambient cargo outbound [tonne]
$Q_{units,refr}$	Amount of refrigerated cargo outbound [tonne]

Abbildung 19: Beispiel Fraunhofer Emissionsintensitäten¹⁰⁸

In Abbildung 19 werden die Emissionsintensitäten aus den Energieverbräuchen berechnet. Dafür werden für jede Aktivitätskategorie die Emissionen aus den Energieverbräuchen durch die Anzahl der diese Aktivitätskategorie durchlaufenden ausgehenden Ladeeinheiten dividiert. Dies ergibt den für diese Kategorie repräsentativen „allocation coefficient“ (Allokationskoeffizient). In einem nächsten Schritt werden die spezifischen Emissionen für die Ladeeinheiten „ambient“ und „refridgerated“ ermittelt, wie in Abbildung 20 dargestellt.¹⁰⁹

¹⁰⁷ Vgl. Kerstin Dobers et al. (2019) S. 41

¹⁰⁸ Kerstin Dobers et al. (2019) S. 42

¹⁰⁹ Vgl. Kerstin Dobers et al. (2019). S. 41f.

For ambient units	$em_{amb} = ac_1 + ac_2$
For refrigerated units	$em_{refr} = ac_2 + ac_3$
em	Emissions intensities for ambient or refrigerated unit [kg CO ₂ e/tonne]
ac_1	Allocation coefficient for heating of units [kg CO ₂ e/tonne]
ac_2	Allocation coefficient for all other processes at the site [kg CO ₂ e/tonne]
ac_3	Allocation coefficient for refrigerating units [kg CO ₂ e/tonne]

Abbildung 20: Beispiel Fraunhofer Ergebnisse¹¹⁰

Hierbei werden die Allokationskoeffizienten aller Aktivitätskategorien summiert, die die entsprechende Ladeinheit durchlaufen muss. So werden alle Emissionen verursachungsgerecht auf die Ladeinheiten aufgeteilt.

5.4 Adaptionen der Fraunhofer Methodik

In dem folgenden Abschnitt wird gezeigt, welche entscheidenden Unterschiede es zwischen der Berechnungslogik nach Fraunhofer und der für dieses Tool entwickelten Logik gibt.

Die ISO 14083 legt die zur Berechnung berücksichtigenden Prozesse fest, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: Laut ISO 14083 zu berücksichtigende Prozesse

Zu berücksichtigen:	<i>Hub-Vorgänge (die die Transportkette vom Absender einer Lieferung bis zum Empfänger oder vom Startort einer Fahrt bis zum Zielort der Fahrt ausmachen), die Energie verbrauchen oder Kältemittelverluste verursachen.¹¹¹</i>
Optional zu berücksichtigen:	<i>Für Emissionen in Bezug auf Energie, die von sich temporär in Hubs aufhaltenden Fahrzeugen oder Schiffen verbraucht wird,</i>

¹¹⁰ Kerstin Dobers et al. (2019) S. 42

¹¹¹ Österreichisches Normungsinstitut (ON) (2022) S. 106

	<p>sollte eine Allokation zum Transportvorgang erfolgen.¹¹²</p> <p><i>Der Energieverbrauch für IKT-Services, die von externen Serveranbietern bezogen werden, muss aus der Berechnung der Hub-Emissionen ausgeschlossen werden, [...].¹¹³</i></p>
<p>Nicht zu berücksichtigen:</p>	<p>Ein- und ausgehende Transportvorgänge des vorherigen oder nachfolgenden Transportkettenelements (z. B. Fahrzeuge oder Schiffe, die in den oder aus dem Hub fahren)</p> <p>Netzstrom, der zum Aufladen von Elektrofahrzeugen verwendet wird, die das Zentrum verlassen</p> <p>Nachfüllen von Kältemitteln in Kühlcontainer oder -fahrzeuge</p> <p>Lagerung von Waren zum Zwecke des Aufenthalts</p> <p>Pendeln von Hub-Mitarbeitern¹¹⁴</p>

Folgende laut Fraunhofer verwendeten Begriffe wurden beibehalten bzw. ergänzt:

- „Operations“ = Prozesse
- „amount of outgoing cargo“ = Anzahl der Ladeeinheiten
- “cargo” = Frachttypen
- “activity categories” = Anforderungen
- “consumed resources” = Energieverbraucher

¹¹² Österreichisches Normungsinstitut (ON) (2022) S. 106

¹¹³ Österreichisches Normungsinstitut (ON) (2022) S. 107

¹¹⁴ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (ON) (2022). S. 28f., 106f.

Im ersten Schritt werden Prozesse und Frachttypen bestimmt, die es am Terminal gibt, wie in Abbildung 21 ersichtlich. Diese werden einander zugeordnet. Es stellt sich die Frage: Welcher Frachttyp verwendet welche Prozesse? Daraus entstehen die sogenannten Anforderungen. Diese ersten Schritte sind äquivalent zu der Vorgehensweise von Fraunhofer IML.

Die Aufteilung der Energieverbraucher erfolgt nach dem jeweiligen Energieträger, wie beispielsweise Diesel, Strom usw. In dem Dokument von Fraunhofer IML werden die Emissionen ebenso nach den Verursachern aufgeteilt. Jedoch werden diese anders dargestellt, in dem in Zusammenhang mit dieser Arbeit entwickeltem Tool werden die Energieverbraucher einem Prozess zugeordnet. Dies erfolgt in der ursprünglichen Logik nach Fraunhofer dadurch, dass bereits bei der Bezeichnung der Energieverbraucher Unterschiede gemacht werden. In diesem Fall entfällt dieser zusätzliche Schritt der Zuordnung der Energieverbraucher. Durch die Wahl von Microsoft Excel als Basis für das Tool konnte auf diesen Schritt nicht verzichtet werden.

Die Berechnung unterscheidet sich kaum, durch die höheren Datenmengen und teilweise veränderten Eingaben werden mehrere Zwischenschritte durchgeführt. Am Ende erfolgt die Ausgabe der Emissionen pro Ladeinheit. Durch die detaillierte Berechnung ist es möglich genauere Ergebnisse und Diagramme zu liefern. Zudem werden alle CO₂-Emissionen in Energie umgerechnet, um zusätzliche Angaben gewährleisten zu können. Dies wird gemäß der Berechnungslogik nach Fraunhofer nicht berücksichtigt.

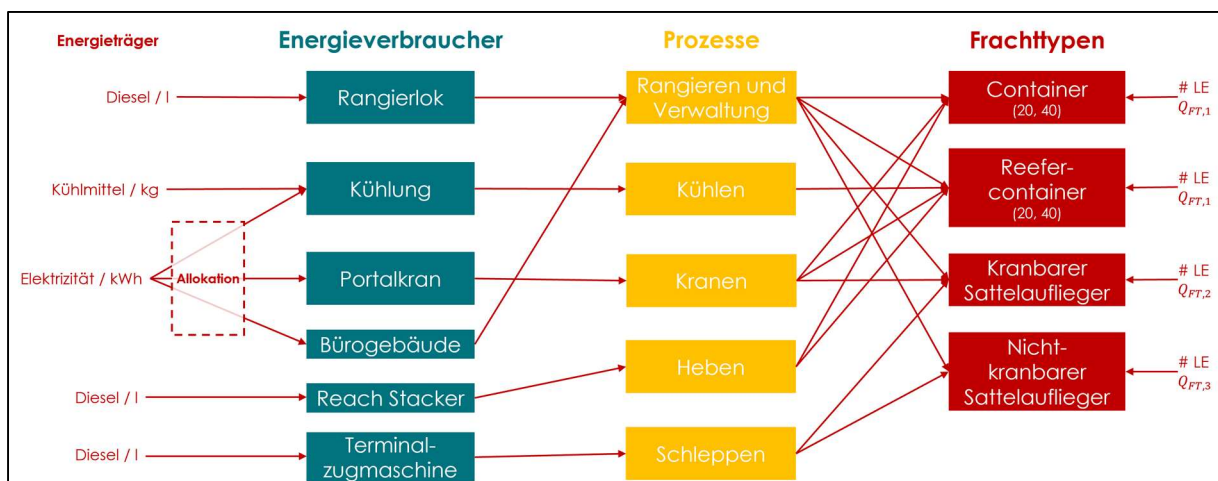


Abbildung 21: Berechnungslogik CO₂-Kalkulationstool¹¹⁵

¹¹⁵ Eigene Darstellung

Abbildung 21 zeigt zudem, dass jeder Energieverbraucher nur einem Prozess zugeordnet werden darf. Bei der Bestimmung der Anforderungen zwischen Prozessen und Frachttypen sind mehrfach Nennungen gültig.

5.5 Gestaltung der Ergebnisse

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt in Tabellen, jedoch ist es auch möglich diese in einem PDF-Dokument abzubilden. Dabei werden alle relevanten Informationen, Zahlen und Diagramme dargestellt.

Für die Ausgabe der jeweiligen Werte pro Frachttyp wurde sich für ein gestapeltes Balkendiagramm entschieden, dies dient dazu, um die GHG-Emissionen bzw. Energie der Standardladeeinheit und ihren Prozessen zu sehen. Alle anderen Ladeeinheiten bauen auf diese auf und werden durch zusätzliche Prozesse ergänzt. Diese Darstellung ermöglicht eine umfassende Übersicht.

Es ist möglich sämtliche Zwischenschritte oder auch ergänzende Tabellen, wie die Umrechnungsfaktoren oder den Energieverbrauch der einzelnen Energieträger auszugeben.

Es werden lediglich die Ergebnisse der Berechnungen wiedergegeben, weitere Handlungsempfehlungen werden im Laufe dieser Arbeit nicht gemacht.

5.6 Abgrenzung zu anderen Tools zur Emissionsberechnung

Auf diversen Internetplattformen gibt es bereits von verschiedenen Unternehmen Tools, um CO₂-Emissionen an Logistikstandorten einfach und schnell berechnen zu können. Diese zeichnen sich oft durch die Grenzen im Anwendungsbereich heraus.

5.6.1 EcoTransIT World

Eines der bekanntesten hierbei ist das EcoTransIT World, online ist eine vereinfachte Version dieses Emissionsrechners kostenlos vorhanden, jedoch gibt es für Unternehmen die Möglichkeit eine individuelle Version mit deutlich erweiterten Funktionen zu erhalten. Das Eingabefenster für die Standardberechnung verfügt über wenige Felder. Bei der Wahl des Eingabemodus auf „Erweitert“ öffnen sich neue Parameter (siehe Abbildung 22).¹¹⁶

¹¹⁶ Vgl. EcoTransIT World | (2020).

BERECHNUNGSPARAMETER

Eingabemodus

Fracht

Anzahl	Gewicht	Typ	t/TEU
<input type="text" value="100"/>	<input type="text" value="Loses und Stückgut (Tonnen)"/>	<input type="text" value="Durchschnittsgut"/>	<input type="text" value="10"/>

Umschlag definieren:

Fähre

Versandort

Gleisanschluss verfügbar

Transportdienstleistung ✕

Verkehrstyp	Fahrzeugklasse	Antriebsart	Emissionsstandard	Beladungsgrad	Leerfahrtenanteil
<input type="text" value="Lkw"/>	<input type="text" value="26-40 t"/>	<input type="text" value="diesel"/>	<input type="text" value="EURO 5"/>	<input type="text" value="60 %"/>	<input type="text" value="20 %"/>

Kühleinheit:

+ VIA

+ TRANSPORTDIENSTLEISTUNG

Empfangsort

Gleisanschluss verfügbar

BERECHNEN
EINGABE LÖSCHEN

Abbildung 22: EcoTransIT World Erweiterte Ansicht¹¹⁷

Neben den Angaben zu dem Versandort und Empfangsort müssen Angaben zur Fracht gemacht werden (das Gewicht bzw. die Anzahl der TEU). Unter dem Reiter Transportdienstleistung wird der Verkehrsträger gewählt und detaillierte Angaben zu diesem. Dies kann beliebig erweitert werden und auch mehrere Zwischenschritte können problemlos eingeführt werden.¹¹⁸

Als Ergebnisse werden sowohl die Megajoule an dem gesamten Energieverbrauch als auch die Tonnen CO₂e ausgegeben. Alle Ausgaben sind sowohl als Well-to-Tank als auch als Tank-to-Wheel angegeben. In einem gesonderten Reiter werden die Entfernungen gezeigt. Darüber hinaus werden alle Schadstoffe in Tabellen und Graphen detailliert aufgeschlüsselt beispielsweise Kohlendioxid, Stickoxide, Schwefeldioxid, Nicht-Methan-Kohlenwasserstoff und Feinstaub.¹¹⁹

¹¹⁷ EcoTransIT World | (2020).

¹¹⁸ Vgl. EcoTransIT World | (2020).

¹¹⁹ Vgl. EcoTransIT World | (2020).

5.6.2 Reff Tool

Neben dem häufig verwendeten EcoTransIT Tool hat Fraunhofer IML in Anlehnung an das veröffentlichte Paper, welches erstmals in Kapitel 2.4.4 erwähnt wurde, ein Tool entwickelt, um Emissionen an Logistikstandorten zu berechnen. Dieses nennt sich Reff Tool (Resource Efficiency at Logistics Sites).¹²⁰

Im ersten Schritt werden Angaben zu dem Typ des jeweiligen Hubs gemacht: Umschlag, Lager, Lagerung und Umschlag, Containerterminal usw. Danach müssen Angaben zu den Energieverbrauchern gemacht werden, wie in Abbildung 23 ersichtlich.

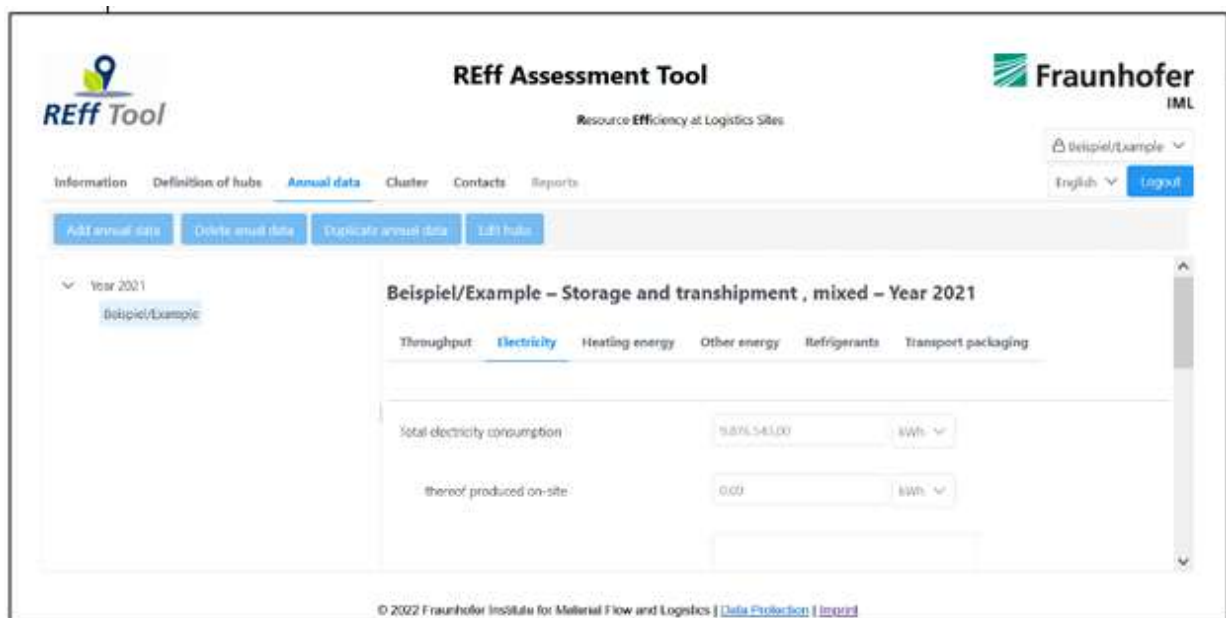


Abbildung 23: REff Tool Annual data¹²¹

Die Ergebnisse der Berechnungen können dann basierend auf verschiedenen Daten dargestellt werden. Einerseits nach dem Typ des Hubs und andererseits nach den Kategorien der Energieverbraucher. Die Angabe der Emissionen erfolgt in kg CO₂e.¹²²

Online ist eine große Anzahl an Tools zu finden, mit deren Hilfe man Emissionen entlang der Transportkette berechnen kann. Meist sind diese nur auf die Entfernung und der Art des Verkehrsträgers basiert. Für die reine Ermittlung, der an Umschlagpunkten verursachten Emissionen, sind jedoch kaum Rechner vorhanden. In der Literatur fand sich ein Tool mit Hilfe dessen man die Prozesse an Umschlagterminals für den

¹²⁰ Vgl. (2023e)

¹²¹ Dobers, Kerstin (Fraunhofer IML) (2023) S. 14

¹²² Vgl. Dobers, Kerstin (Fraunhofer IML) (2023) S. 25, 29

Schiffsverkehr darstellen konnte. Nichtsdestotrotz war die Ausführung hierbei sehr spezifisch, sodass keine Punkte für die Erstellung des, in dieser Arbeit entwickelten Tool, übernommen werden konnten. Zudem wurde dabei nicht auf die geltenden Normen und Standards eingegangen.

6 Implementierung und Evaluierung des Modells anhand eines exemplarischen Terminals

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Berechnungsmodell erstellt, mit Hilfe dessen die CO₂-Emissionen an Intermodalterminals ermittelt werden können. In dem folgenden Kapitel wird ein Terminal vorgestellt und die Ergebnisse der Evaluierung präsentiert.

6.1 Ausgangslage

Betrachtet wird ein intermodales Terminal mit Sitz in Österreich. Der Umschlag erfolgt mittels zwei Portalkränen und weiteren Umschlaggeräten, die in folgender Tabelle (Tabelle 5) ersichtlich sind.

Tabelle 5: Eingesetzte Umschlaggeräte exemplarisches Terminal

Umschlaggerät	Einsatzzweck
Portalkran 1	Umschlag
Portalkran 2	Umschlag
Reachstacker	Umschlag
Containerstapler 1	Umschlag
Containerstapler 2	Umschlag (Leercontainer)
Vollcontainerstapler	Umschlag
Gabelstapler	Containerwerkstätte

In dem Terminal werden neben dem Umschlag auch weitere Prozesse wie Belüftung, Kühlung von Reefer-Containern oder die Reparatur von beschädigten Containern durchgeführt. Daraus ergibt sich eine jährliche Umschlagsmenge von 85 550 TEU.

6.2 Eingabedaten

Die Prozesse am Terminal wurden folgendermaßen eingeteilt.

Prozesse:

- Abfertigung LKW
- Containerbelüftung
- Containerreparatur

- Nicht für Umschlag relevant
- Reefer
- Umfuhren
- Umschlag
- Verschub
- Verwaltung

Neben den Prozessen mussten auch Frachttypen festgelegt werden. Hierfür wurden Folgende ausgewählt.

Frachttypen:

- Umgeschlagene LE
- Belüftete LE
- Werkstatt LE
- Reefer LE
- Umfuhren LE

Neben beiden bereits genannten Eingabedaten, müssen noch Angaben zu den Energieverbrauchern gemacht werden. Bei dem betrachteten Terminal sind neben den Energieverbräuchen der Umschlaggeräte weitere bedeutsame Verbraucher wie die Containerwerkstatt, Umschlagplatzbeleuchtung, Gleisbeleuchtung, Containerbelüftung und Reefer angeführt.

Die Energieverbraucher variieren je nach Terminal, in diesem wird der zusätzliche Service der Containerreparatur angeboten. Daher wurde ein eigener Prozess hierfür erstellt und auch ein eigener Frachttyp. Dies zeigt sich auch in den Ergebnissen wieder. Teile der Werkstatt, die sich der Reparatur von Rangierloks widmen, werden im Laufe der weiteren Berechnung als „Nicht Umschlag relevant“ gekennzeichnet und separat ausgegeben, da diese keinen Beitrag zum Umschlag leisten.

Im Laufe der Entwicklung entstand eine weitere Möglichkeit der Einteilung der Energieverbraucher. Diese können als „Nicht Umschlag relevant“ charakterisiert werden. Der Grund für diese Entscheidung ist, dass einige Verbräuche durchaus wichtig für das Endergebnis sind, jedoch nicht für den Umschlag bedeutend sind. Da insbesondere das Ergebnis der Emissionen, die direkt mit dem Umschlag zusammenhängen, für die Endausgabe wichtig sind, wird zwischen diesen beiden Punkten unterschieden.

Bei der Wahl der Frachttypen werden solche gewählt, zu welchen auch geeignete Energieverbräuche bekannt sind. In diesem Fall hat man einen „Standard-Frachttyp“ und dann eine Spezialisierung auf die jeweiligen Prozesse.

Die Belüftung der Ladeeinheiten erfolgt direkt am Terminal und wird auch mitberücksichtigt. Die Kühlung ist ein weiteres Service, welches von dem Terminal angeboten wird und führt dementsprechend zu einem eigenen Prozess bzw. Frachttyp.

6.3 Ergebnisse der Berechnung

Als Ergebnis der Berechnungen sind die CO₂-Emissionen in kg CO₂e angegeben. Neben diesen werden auch alle Verbräuche in kWh Energie umgerechnet, da dies ein bedeutender Faktor am Terminal und ein guter Indikator für die Effizienz des Terminals ist.

Hintergrund der Berechnung ist die Logik nach Fraunhofer IML, welche bereits in Kapitel 5.3 diskutiert wurde. Die Endausgabe der Werte erfolgt jeweils pro Ladeinheit. In diesem Beispiel zeigt sich, wie in folgender Tabelle (Tabelle 6) ersichtlich, dass Reefer Container den höchsten Wert aufweisen. Danach erfolgt ein großer Schritt zu den nächsten Ladeeinheiten, welche alle nahe beieinander liegen.

Tabelle 6: Energie pro Ladeinheit exemplarisches Terminal

Frachttyp	Energie pro Ladeinheit (in kWh)
Umgeschlagene LE	22
Belüftete LE	28
Werkstatt LE	27
Reefer LE	79
Umfahren LE	31

Bei der Betrachtung der CO₂-Emissionen sieht man einen ähnlichen Trend. Dieser ist in Tabelle 7 ersichtlich.

Tabelle 7: GHG Emissionen pro Ladeinheit exemplarisches Terminal

Frachttyp	GHG pro Ladeinheit (in kg CO₂e)
Umgeschlagene LE	5
Belüftete LE	6
Werkstatt LE	6
Reefer LE	13
Umfahren LE	7

6.4 Ergebnisse und Interpretation

Die Ausgabe der Endergebnisse ist in dem Excel-Dokument ersichtlich, zudem gibt es die Möglichkeit die Ergebnisse in einem separaten PDF-Dokument darzustellen.

Die Darstellung des gesamten Energieverbrauches in kWh (Abbildung 24) zeigt, dass der Großteil des Verbrauches für den Umschlag anfällt, nämlich mehr als die Hälfte. Anschließend folgt der Verschub und die Abfertigung LKW daraufhin sieht man, dass die Auswirkungen der übrigen Prozesse sehr gering sind.

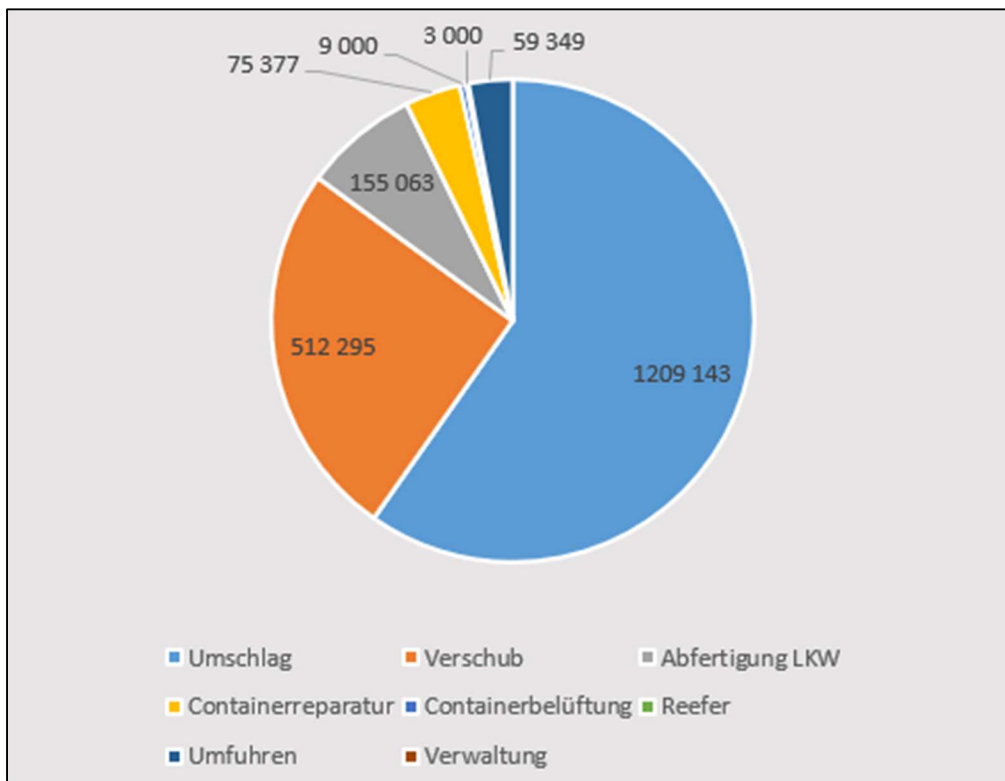


Abbildung 24: Energieverbrauch in kWh exemplarisches Terminal

Bei der Betrachtung der GHG-Emissionen in kg CO₂e (Abbildung 25) aufgeteilt nach Prozessen zeigt sich ein ähnlicher Trend, wie in der zuvor betrachteten Abbildung. Fast die Hälfte der Emissionen werden durch den Umschlag verursacht. Ebenso der Verschub verursacht einen großen Teil. Die übrigen Prozesse verteilen sich sehr gleichmäßig. Die Containerreparatur verursacht am wenigsten Emissionen.

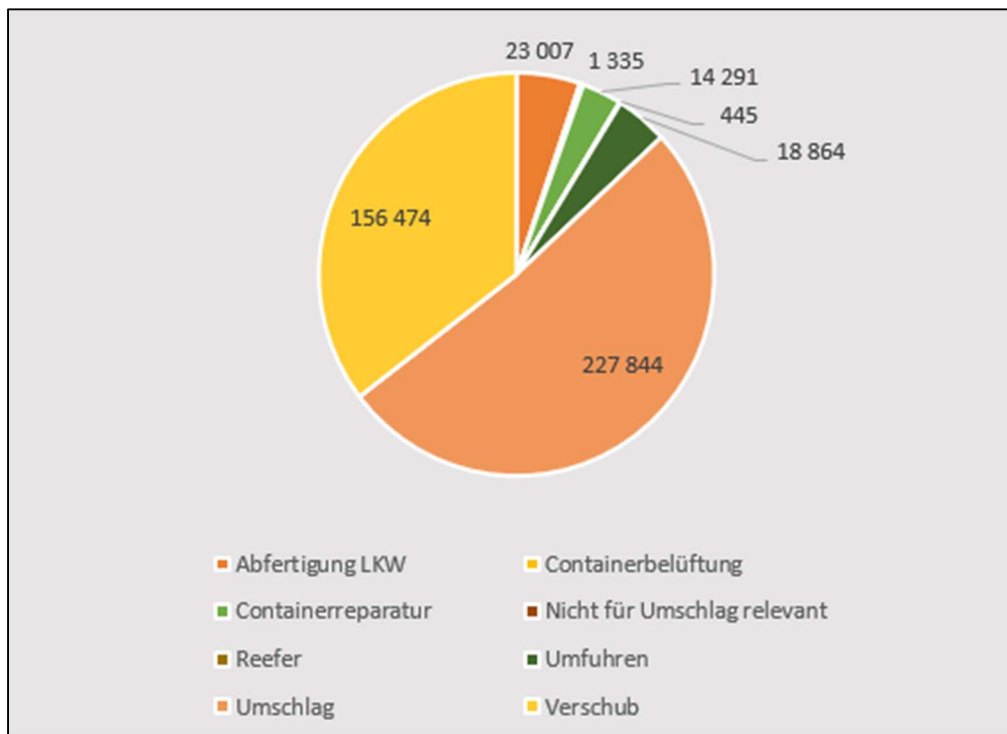


Abbildung 25: Emissionen in kg CO2e exemplarisches Terminal

Die Ergebnisse zeigen, wie zu erwarten, dass der Umschlag die höchsten Emissionen verursacht. In dem betrachteten Terminal ist zudem der Prozess der Containerreparatur zu beachten. Je nachdem welche Prozesse am Terminal durchgeführt werden, fallen die Ergebnisse unterschiedlich aus. Die „Standardprozesse“ wie Umschlag und Verschub werden immer angenommen und bilden auch meist den Großteil der entstandenen CO2-Emissionen bzw. des Energieverbrauches. Jedoch können andere Prozesse ebenso einen entscheidenden Beitrag leisten.

Mit Hilfe einer solchen genauen Darstellung können dann Prozesse analysiert und Einsparungsmaßnahmen getroffen werden. Diese mögliche Erweiterung der Thematik wird in dieser Arbeit nicht näher behandelt.

7 Diskussion

Das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Tool schließt die Lücke bei der Berechnung der Emissionen entlang der gesamten Transportkette. Es können an Umschlagterminals genaue Angaben zu den Emissionswerten erfolgen und es muss nicht mehr auf Durchschnittswerte zurückgegriffen werden. Ein bedeutender Vorteil ist zudem die einfache Handhabung durch die Wahl von Microsoft Excel als Plattform.

Die Darstellung der Ergebnisse basierend auf den Prozessen bzw. Frachttypen sorgt für eine sehr gute Aufteilung, welche insbesondere eine Grundlage für Einsparungsmaßnahmen bildet. Möglichkeiten zur Reduzierung der Emissionen an Intermodalterminals werden in dieser Arbeit und auch in dem entworfenen Tool nicht berücksichtigt und sind vom Terminalbetreiber selbst abzuleiten.

Eine weitere Grenze des Modells ist die genaue Aufschlüsselung der Emissionen. Es werden lediglich CO₂-Äquivalente angegeben keine weiteren spezifischen Schadstoffe oder Treibhausgase. Dies kann in einem weiteren Schritt vorteilhaft sein wurde jedoch hierbei vernachlässigt. In Hinsicht auf weitere Forschungsarbeiten in diesem Bereich wäre dies ein interessanter Einsatz, welcher ohne erheblichen Aufwand umgesetzt werden kann.

Essenziell bei der Entwicklung war es, alle geltenden Normen und Standards einzuhalten und als Ergebnis einen detaillierten Überblick zu liefern. Schlussendlich ist der Erfolg der Berechnung immer abhängig von den Eingabedaten, daher müssen diese gewissenhaft und detailliert angegeben werden.

7.1 Limitationen

Die zentralen Limitationen der vorliegenden Arbeit ergeben sich aus dem Mangel an vorhandener Literatur, insbesondere bei der Berechnung der CO₂-Emissionen in Intermodalterminals. Auf Grund der fehlenden spezifischen Literatur gestaltete sich auch die Suche nach bereits vorhandenen Tools, speziell in diesem Bereich, als komplex.

Das entworfene Modell bietet eine detaillierte Berechnung der CO₂-Emissionen, die an einem Intermodalterminal entstehen. Die Basis genauer Ergebnisse bieten die Eingabedaten. Die Ergebnisse können Grundlage für weitere Einsparungsmaßnahmen darstellen. In einem weiteren Schritt können neben den CO₂-Emissionen auch andere Treibhausgase erfasst werden. Je nach Verwendungszweck ist das Tool hierfür leicht

erweiterbar. Diese Erweiterbarkeit des Tools und auch der verfassten Arbeit wird in Kapitel 7.2 diskutiert.

In der Erprobung des Tools stellte sich heraus, dass insbesondere die Eingabe der Daten zu Beginn herausfordernd ist. Dies erfordert gewisse Grundlagen in diesem Bereich und gewisse Kenntnisse über die Begrifflichkeiten und Prozesse am Terminal. Die gebrauchten Daten der Energieverbraucher müssen durch den Betreiber aus bekannten Werten ermittelt werden. Dabei müssen diese gegebenenfalls aus vergangenen Perioden ermittelt werden. Anschließende Berechnungen bieten dabei einen wesentlich geringeren Aufwand. In der Praxis zeigte sich, dass Terminalbetreibern oft die Übersicht dieser Daten fehlt und der Prozess der Datenakquise längere Zeit benötigen kann.

Dieser Prozess der Datenerhebung könnte durch zusätzliche Beschreibungen oder Simplifizierungen des Tools erleichtert werden, um auch dem ungeübten Bearbeiter die Handhabung zu ermöglichen. Eine Erweiterung des Tools wäre auch hierbei eine Möglichkeit.

Durch den Einsatz von Microsoft Excel als Software ist eine gewisse Kenntnis über die Funktionsweise dieses Programmes, Voraussetzung für die Verwendung des Tools. Eine andere Software, welche im Hintergrund läuft, eine grafische Eingabefläche bietet und lediglich die korrekten Eingaben gemacht werden müssen, könnte den Nutzer optimal unterstützen.

7.2 Implikationen

7.2.1 Für die Wissenschaft

In Hinblick auf weitere Arbeiten zu diesem Thema bieten die Erkenntnisse dieser Arbeit eine gute Grundlage. Da es in der vorhandenen Literatur kaum Entwicklungen in diesem Bereich gibt, kann man die Erkenntnisse aus dieser Arbeit weiterführend nutzen.

Sämtliche Aspekte der Betrachtung der Energieverbraucher können noch detaillierter untersucht werden, um auch die Ausgabe der Ergebnisse noch detaillierter gestalten zu können. Zudem können für die jeweiligen Verbraucher gezielte Einsparungsmaßnahmen gesetzt werden und die Auswirkungen dieser auf die CO₂-Bilanz diskutiert werden.

Das Thema Nachhaltigkeit wird in der Literatur bereits mehrfach erwähnt, jedoch ist dies in der Logistik noch ein Thema, welches in einigen Bereichen kaum Anklang findet. So findet man in der vorhandenen Literatur besonders im Transportsektor kombinierter Verkehr nur wenige Arbeiten, die tatsächlich nachhaltige Lösungen bieten, für die Reduzierung der CO₂-Emissionen. Nach der Ermittlung der CO₂-Emissionen am Terminal ist es von hoher Bedeutung auch geeignete Einsparungsmaßnahmen durchzuführen. Diese sollten für jeden Prozess einzeln betrachtet werden.

Im Laufe der Recherche zeigte sich auch, dass die Thematik der Antriebe von Anlagen und Fahrzeugen, die für den Umschlag gebraucht werden, kaum aufgegriffen wird. Die immer höhere Elektrifizierung in diesem Bereich wird von den Herstellern der Maschinen bereits erprobt, findet in der Praxis jedoch kaum Anschluss. Eine erhebliche Verbesserung in diesem Gebiet würde sich auch auf die entstehenden CO₂-Emissionen auswirken. Dies fordert vor allem Forschung und Entwicklung, um neue Technologien möglichst schnell in den täglichen Betrieb miteinbinden zu können. Erkenntnisse in diesem Bereich würden sich nicht nur positiv auf den kombinierten Verkehr ausüben, sondern auf alle Transportsektoren.

7.2.2 Für die Wirtschaft

Da das Thema der Nachhaltigkeit und Reduzierung der CO₂-Emissionen immer wichtiger wird, sollten auch Terminalbetreiber Kenntnisse darüber erlangen und strategische Maßnahmen setzen. Um nachhaltige Einsparungsmaßnahmen umsetzen zu können, müssen zunächst alle entstandenen Emissionen genau ermittelt werden und den Prozessen bzw. Verbrauchern zugeordnet werden. Dies ist nur durch einerseits einer detaillierten Dokumentation und Erfassung der Daten möglich und andererseits durch eine exakte Berechnung.

In vielen Unternehmensbereichen ist eine jährliche CO₂-Bilanzierung Pflicht. Ein passendes Tool, um die CO₂-Emissionen schnell und einfach berechnen zu können, würde dem Unternehmen die Arbeit erheblich erleichtern. Durch die ständig wachsenden Anforderungen in dem Thema Nachhaltigkeit, wird es auch immer wichtiger werden die entstandenen Emissionen zu berechnen und zu bewerten. Aber neben den CO₂-Emissionen stellt auch der Energieverbrauch einen wichtigen Punkt dar. Die zunehmende Elektrifizierung der Anlagen und Fahrzeuge verursacht immer höhere Energieverbräuche. Daher ist es ratsam Emissionen und Verbräuche in Energie umzurechnen, um auch diesen Wert erfassen zu können.

Bei Betrachtung der verwendeten Energie ist es wichtig auch hier auf nachhaltige Alternativen zu setzen. Denn eine zunehmende Elektrifizierung der Anlagen und Geräte ist nur dann von Vorteil, wenn auch die CO₂-Emissionen nachhaltig eingespart werden können.

Conclusio

Gegenstand der vorliegenden Arbeit war es, ein Modell für die Quantifizierung von Treibhausgasen in Intermodalterminals mittels einer geeigneten Software zu erstellen.

Zu Beginn der Entwicklung des Modells wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, dabei wurde untersucht, ob es bereits vorhandene Studien zu dieser Thematik gibt. Neben den betrachteten Studien lag der Fokus auf den derzeit geltenden Normen und Standards in der CO₂-Bilanzierung. Am meisten verwendet werden die Grundlagen des GHG-Protokolls und des GLEC-Frameworks. Die in diesen Bereichen geltende Norm ist die EN ISO 14083.

Zunächst musste eine Berechnungslogik festgelegt werden, diese bildete sich in Anlehnung an einem von Fraunhofer IML entwickeltem Guide. Mit Hilfe dieser Erkenntnis konnte ein Excel-Tool erstellt werden, welches durch einfache Eingaben wichtige Ergebnisse für den Terminalbetreiber liefert.

Im Rahmen der Entwicklung wurde das Tool an verschiedenen Terminals erprobt. Die exemplarische Anwendung der Methodik zeigte, dass insbesondere am Anfang ein hoher Aufwand zur Erhebung der Daten entsteht, dieser vermindert sich mit den zunehmenden gewonnenen Erkenntnissen. Mit den erhaltenen Daten konnten die grundlegenden Parameter ermittelt und somit eine umfangreiche Berechnung durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Berechnung liefern sowohl die Summe der GHG-Emissionen in kg CO₂e als auch den Gesamtverbrauch an Energie in kWh. So konnten wichtige Erkenntnisse über die Energieverbraucher und Prozesse gewonnen und praxistaugliche Werte errechnet werden. Die Berechnung kann für unterschiedliche Terminals durchgeführt werden und unterscheidet sich bei der Betrachtung der grundlegenden Prozesse kaum. Spezifische Prozesse und Frachttypen können in der Methodik berücksichtigt werden und führen zu einem dementsprechenden Unterschied der Ergebnisse.

Die genaue Ermittlung, der an Umschlagterminals angefallenen CO₂-Emissionen ist ein kleiner Teil entlang der gesamten Transportkette, jedoch langfristig gesehen nicht zu vernachlässigen. Insbesondere in Bezug auf das immer wichtiger werdende Thema der Nachhaltigkeit im Bereich der Logistik

8 Literaturverzeichnis

(2023a): About WRI & WBCSD | GHG Protocol, abgerufen am: 25.07.2023.

Achim Klukas; Dr. Agnes Eiband; Diana Fieberg; Ckemens Bochynek; Nils Gastrich (2019):
PRAXISLEITFADEN FÜR DEN KOMBINIERTEN VERKEHR.

Alexander Weiss (2014): CO₂-Bilanz von Distributionszentren. Diplomarbeit. Technische
Universität Graz.

(2023b): Arten von Logistikzentren | Funktion der Logistik | Barcodelösungen für die Logistik |
KEYENCE International Belgium(Deutsch),

https://www.keyence.eu/dede/ss/products/auto_id/logistics/role/type.jsp, abgerufen am:
30.06.2023.

Austrian Standards International: Methode zur Berechnung und Deklaration des
Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und
Personenverkehr). Austrian Standards International (2013). 03.080.01; 03.220.01, abgerufen
am: 21.07.2023.

Azarkamand, Sahar; Ferré, Guillem; Darbra, R. M. (2020): Calculating the Carbon Footprint in
ports by using a standardized tool, in: The Science of the total environment, Jg. 734, S. 139407.
10.1016/j.scitotenv.2020.139407.

Botana, Carlos; Fernández, Emilio; Feijoo, Gumersindo (2023): Towards a Green Port strategy:
The decarbonisation of the Port of Vigo (NW Spain), in: The Science of the total environment,
Jg. 856, Pt 2, S. 159198. 10.1016/j.scitotenv.2022.159198.

Bottani, Eleonora (2017): The 19th International Conference on Harbor, Maritime and
Multimodal Logistics Modelling and Simulation (HMS 2017) Barcelona, Spain, September 18-20,
2017, DIME Università. ISBN 978-88-97999-87-4.

Böttger, Christian (2020): Bahnsektor — Krise trotz erhöhter Finanzmittel, in: Wirtschaftsdienst,
Jg. 100, Nr. 3, S. 194–200. 10.1007/s10273-020-2602-x.

Budiyanto, Muhammad Arif; Huzaifi, Muhammad Hanzalah; Sirait, Simon Juanda (2019):
Estimating CO₂ Emissions in a Container Port based on Modality Movement in the Terminal
Area, in: International Journal of Technology, Jg. 10, Nr. 8, S. 1618. 10.14716/ijtech.v10i8.3508.

Chang, Young-Tae; Song, Younghun; Roh, Younghoon (2013): Assessing greenhouse gas
emissions from port vessel operations at the Port of Incheon, in: Transportation Research Part
D: Transport and Environment, Jg. 25, S. 1–4. 10.1016/j.trd.2013.06.008.

Clausen, Uwe; Geiger, Christiane (2013): Verkehrs- und Transportlogistik, Springer Vieweg. ISBN
978-3-540-34298-4.

(2023c): Climate Change 2021: The Physical Science Basis | Climate Change 2021: The Physical Science Basis, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>, abgerufen am: 08.08.2023.

(2016): Commercial transport Proceedings of the 2nd Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic 2015, Springer. ISBN 978-3-319-21265-4.

Craig, Anthony J.; Blanco, Edgar E.; Sheffi, Yossi (2013): Estimating the CO₂ intensity of intermodal freight transportation, in: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Jg. 22, S. 49–53. 10.1016/j.trd.2013.02.016.

Daly, Herman E. (1990): Toward some operational principles of sustainable development, in: Ecological Economics, Jg. 2, Nr. 1, S. 1–6. 10.1016/0921-8009(90)90010-R.

Der Rat der europäischen Gemeinschaften (1992): Richtlinie 92/106EWG des Rates: Über die Festlegung gemeinsamer Regeln für bestimmte Beförderungen im kombinierten Güterverkehr zwischen Mitgliedstaaten. Nr. L 368/39.

Dobers, Kerstin (Fraunhofer IML) (2023): GILA webinar on market study 2022.

Dr. Christoph Seidelmann (2010): 40 Jahre Kombiniertes Verkehr Straße-Schiene in Europa: Vom Huckepackverkehr zum Intermodalen Transportsystem, Internationale Vereinigung der Gesellschaften für den kombinierten Verkehr Schiene-Straße.

EcoTransIT World | (2020): EcoTransIT World - Emissionsrechner, <https://www.ecotransit.world/de/emissionsrechner/>, abgerufen am: 21.07.2023.

IFEU; SGKV (2002): Vergleichende Analyse von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen im Straßengüterverkehr und Kombinierten Verkehr Straße/Schiene.

Jakob Tuna (2021): Wohin mit der Logistik? Entwurf eines sektoralen Raumordnungsprogramms für Logistik in Niederösterreich. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, <https://scholar.archive.org/work/byfb55ybcndefmshwjgtaa7x2i/access/wayback/https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/17948/1/tuna%20jakob%20-%202021%20-%20wohin%20mit%20der%20logistik%20entwurf%20eines%20sektoralen...pdf>.

Jan Hildebrandt; Burkhard Bieder; Klaus-Uwe Sondermann; Viktoria Präg; Michael Spielmann; Bärbel Hundt (2014): D3.1: Intermodal Terminal Eco-efficiency Calculator (ITEC).

Jan Kaffka; Uwe Clausen; Zoran Miodrag; Holger Pitsch (2015): Allokation von Emissionswerten auf Behälterebene in multimodalen Umschlagsanlagen mittels Simulation.

Kerstin Dobers; David Rüdiger; Jan-Philipp Jarmer (2019): GUIDE FOR GREENHOUSE GAS EMISSIONS ACCOUNTING FOR LOGISTIC SITES: Focus on transshipment sites, warehouses and distribution centres.

kombiverkehr.de (2023): Umschlagtechniken,

https://www.kombiverkehr.de/de/service/allgemeine_infos/umschlagtechniken/, abgerufen am: 04.01.2023.

Konecranes Deutschland (2013): Konecranes: Erster Hybrid Reach Stacker der Welt im Probebetrieb | Corporate press releases, <https://www.konecranes.com/de-de/press/releases/2013/konecranes-erster-hybrid-reach-stacker-der-welt-im-probebetrieb>, abgerufen am: 08.08.2023.

Konecranes Deutschland (2022): Container-Schienenportalkräne, <https://www.konecranes.com/de-de/hafenkrane-service/containerumschlag/container-schienenportalkrane>, abgerufen am: 08.08.2023.

Konecranes Deutschland (2023): Straddle Carrier, <https://www.konecranes.com/de-de/hafenkrane-service/containerumschlag/straddle-carrier>, abgerufen am: 08.08.2023.

Konstantzos, Giorgos E.; Saharidis, Georgios K. D.; Loizidou, Maria (2017): Development of a model for assessing Greenhouse Gas (GHG) emissions from terminal and drayage operations, in: *Operational Research*, Jg. 17, Nr. 3, S. 807–819. 10.1007/s12351-016-0242-0.

Kuhlmann, Adina Silvia (2013): Konstruktion und Implementierung eines Optimierungsmodells für den Kombinierten Güterverkehr. Dissertation, Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN 978-3-658-02472-7.

(2023d): L 526,

<https://www.liebherr.com/de/aut/produkte/baumaschinen/erdbewegung/radlader/details/650358.html>, abgerufen am: 12.07.2023.

Martin, Heinrich (2006): *Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik ; mit 38 Tabellen*, Vieweg. ISBN 978-3-8348-0168-5.

Martin, Heinrich (2014): *Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*, Springer Vieweg. ISBN 9783658031435.

Martínez-Moya, Julián; Vazquez-Paja, Barbara; Gimenez Maldonado, Jose Andrés (2019): Energy efficiency and CO2 emissions of port container terminal equipment: Evidence from the Port of Valencia, in: *Energy Policy*, Jg. 131, S. 312–319. 10.1016/j.enpol.2019.04.044.

Miklautsch, Philipp; Woschank, Manuel (2022): A framework of measures to mitigate greenhouse gas emissions in freight transport: Systematic literature review from a Manufacturer's perspective, in: *Journal of Cleaner Production*, Jg. 366, S. 132883. 10.1016/j.jclepro.2022.132883.

Österreichisches Normungsinstitut (ON): *Treibhausgase — Quantifizierung und Berichterstattung über Treibhausgasemissionen von Transportvorgängen*. Österreichisches Normungsinstitut (ON). 151 S. (2022). 03.220.01;13.020.40, abgerufen am: 21.07.2023.

Page, Matthew J.; McKenzie, Joanne E.; Bossuyt, Patrick M.; Boutron, Isabelle; Hoffmann, Tammy C.; Mulrow, Cynthia D.; Shamseer, Larissa; Tetzlaff, Jennifer M.; Akl, Elie A.; Brennan, Sue E.; Chou, Roger; Glanville, Julie; Grimshaw, Jeremy M.; Hróbjartsson, Asbjørn; Lalu, Manoj M.; Li, Tianjing; Loder, Elizabeth W.; Mayo-Wilson, Evan; McDonald, Steve; McGuinness, Luke A.; Stewart, Lesley A.; Thomas, James; Tricco, Andrea C.; Welch, Vivian A.; Whiting, Penny; Moher, David (2021a): The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews, in: BMJ, Jg. 372, n71. 10.1136/bmj.n71.

Page, Matthew J.; McKenzie, Joanne E.; Bossuyt, Patrick M.; Boutron, Isabelle; Hoffmann, Tammy C.; Mulrow, Cynthia D.; Shamseer, Larissa; Tetzlaff, Jennifer M.; Akl, Elie A.; Brennan, Sue E.; Chou, Roger; Glanville, Julie; Grimshaw, Jeremy M.; Hróbjartsson, Asbjørn; Lalu, Manoj M.; Li, Tianjing; Loder, Elizabeth W.; Mayo-Wilson, Evan; McDonald, Steve; McGuinness, Luke A.; Stewart, Lesley A.; Thomas, James; Tricco, Andrea C.; Welch, Vivian A.; Whiting, Penny; Moher, David (2021b): The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews, in: BMJ (Clinical research ed.), Jg. 372, n71. 10.1136/bmj.n71.

(2023e): REff Tool®, <https://reff.impl.fraunhofer.de/>, abgerufen am: 21.07.2023.

René Grassinger: Bedeutung und Entwicklung des kontinentalen Kombinierten Verkehrs, mit Schwerpunkt des Sattelauflegers als intermodale Ladeeinheit und Bezug auf das Wiencont Containerterminal Freudenu. Diplomarbeit. Fachhochschule des BFI Wien GmbH.

Saharidis, Georgios K.D.; Konstantzos, Giorgos E. (2018): Critical overview of emission calculation models in order to evaluate their potential use in estimation of Greenhouse Gas emissions from in port truck operations, in: Journal of Cleaner Production, Jg. 185, S. 1024–1031. 10.1016/j.jclepro.2018.02.036.

SANY (2023): Port Machinery, [http://product.sanyglobal.com/port_machinery/reach_stacker/](http://product.sanyglobal.com/port_machinery/reach_stack/), abgerufen am: 04.01.2023.

Sim, Jaehun (2018): A carbon emission evaluation model for a container terminal, in: Journal of Cleaner Production, Jg. 186, S. 526–533. 10.1016/j.jclepro.2018.03.170.

Suzanne Greene; Alan Lewis (2019): Global Logistics Emissions Council Framework for Logistics Emissions Accounting and Reporting.

Thomas Nordhausen; Julian Hirt (2020): Manual zur Literaturrecherche in Fachdatenbanken.

(2015): Wirtschaft/Kombinierter Verkehr VDV - Mobi-Wissen, <https://www.mobi-wissen.de/Wirtschaft/Kombinierter-Verkehr>, abgerufen am: 01.07.2023.

Yang, Yi-Chih (2017): Operating strategies of CO₂ reduction for a container terminal based on carbon footprint perspective, in: Journal of Cleaner Production, Jg. 141, S. 472–480. 10.1016/j.jclepro.2016.09.132.

Modellierung von
Treibhausgasemissionen in
Intermodalterminals

Literaturverzeichnis

Yang, Yi-Chih; Lin, Chao-Liang (2013): Performance analysis of cargo-handling equipment from a green container terminal perspective, in: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Jg. 23, S. 9–11. 10.1016/j.trd.2013.03.009.

(2023f): You, too, can master value chain emissions | GHG Protocol, abgerufen am: 04.05.2023.