

Fachgebiet IT in Produktion und Logistik
Fakultät Maschinenbau, Technische Universität Dortmund

Ansatz zur Bestimmung des Carbon Footprint für die Distributionslogistik von Fast Moving Consumer Goods mit Hilfe von Simulation

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Master of Science

vorgelegt von

Dirk Brockmann

Matrikelnummer: 154740

Studiengang: Master Logistik

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe
2. Gutachter: Dipl.-Wirt.-Ing. Mehmet Umut Sari

Ausgegeben am: 12.07.13

Eingereicht am: 27.12.13

Abstract

Thema

Ansatz zur Bestimmung des Carbon Footprint für die Distributionslogistik von Fast Moving Consumer Goods mit Hilfe von Simulation

Beschreibung

Bisherige Analysen sowie Berechnungsmethoden zur Erfassung der CO₂-Emissionen von Dienstleistungen und Produkten basieren fast ausschließlich auf dem Life Cycle Assessment (LCA) Ansatz.

In dieser Arbeit soll der Carbon Footprint einer Supply Chain von Fast Moving Consumer Goods mit Hilfe der Simulation erfasst werden. Zielsetzung ist ein adäquates Datenmodell in diesem Kontext zu erstellen. Hierbei wird u.a. zwischen aggregierten und disaggregierten Zuständen unterschieden. Darüber hinaus wird der LCA Ansatz mit einbezogen und angepasst.

Teilaufgaben

- Definition Begriffe Carbon Footprint und Life Cycle Assessment (LCA)
- Inhaltliche Abgrenzung der beiden o.g. Begriffe
- Simulationsansätze zur Erfassung von CO₂-Emissionen
- Vergleich des LCA Ansatzes mit dem Simulationsansatz zur Erfassung der CO₂-Emissionen
- Identifikation der CO₂ Emissionsquellen in der Distributionslogistik
- Entwicklung eines Datenmodells zur Erfassung des Carbon Footprint von Gütern in der Distributionslogistik
- Bestimmung der zugehörigen CO₂ Parameter
- Ansatz zur Lösung der Zuordnungs- und Darstellungsproblematik von CO₂ Emissionen zu Prozessen und Objekten

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand als Abschlussarbeit meines Masterstudiums Logistik an der Technischen Universität Dortmund am Lehrstuhl für IT in Produktion und Logistik.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe, Leiter des Fachgebiets IT in der Produktion und Logistik, danke ich für die Bereitstellung des Themas und die Möglichkeit an dem Lehrstuhl die Arbeit zu schreiben. Bei Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. M. Umut Sari bedanke ich mich für die Betreuung der Arbeit, den wertvollen Hinweisen und den anregenden Diskussionen, die zum Abschluss der Arbeit beigetragen haben.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Geoinf. Maik Deininger für die Unterstützung und die Bereitstellung von Vorlagen für das Programm und Textsatzsystem LaTeX (latex-project.org), mit dem die vorliegende Arbeit erstellt worden ist.

Bei der Technischen Universität Dortmund und der Universitätsbibliothek Dortmund bedanke ich mich für die zur Verfügungsstellung von Arbeitsräumen und benötigten Büchern, die die Erstellung des Themas erst ermöglicht haben.

Meinen Freunden danke ich für die durchgängige Unterstützung und Motivation bei der Arbeit. Vor allem während des Abschlusses dieser Arbeit hat mir meine Familie und Freundeskreis viel Kraft gegeben. Auch dafür möchte ich mich bedanken. Meinen Eltern danke ich besonders für Ihre Förderung meiner Ausbildung und die Ermutigungen zur Erstellung und Beendigung dieser Arbeit.

Dortmund, im Dezember 2013

Dirk Brockmann

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit	2
1.2 Anforderungen	3
1.3 Inhalt und Übersicht	4
2 Methoden zur Erfassung von Umweltwirkungen	6
2.1 Life Cycle Assessment	6
2.2 Carbon Footprint	8
2.2.1 Definition	8
2.2.2 Phasen des Carbon Footprint	11
2.2.3 Verbindung von CFP- und Simulationsstudie	13
3 Distributionslogistik	15
3.1 Definition	15
3.2 Elemente und Strukturen der Distributionslogistik	16
3.2.1 vertikale Distributionsstruktur	17
3.2.2 horizontale Distributionsstruktur	19
3.3 Prozesse der Distributionslogistik	20
3.3.1 Transport	20
3.3.2 Lagerung	20
3.4 Fast Moving Consumer Goods	22
4 Emissionsquellen in der Distributionskette	24
4.1 Analyse der THG-Emissionen im Transport	24
4.1.1 Straßengüterverkehr	27
4.1.2 Schienengüterverkehr	28
4.1.3 See- und Binnenschifffahrt	29
4.1.4 Luftfrachtverkehr	32
4.1.5 Kombiniertes Verkehr	32
4.2 Analyse der THG-Emissionen für die Lagerung	33
5 Simulation	36
5.1 Definition	36
5.2 Ereignisdiskrete Simulation	38
5.3 Prozess der Modellbildung	40
5.4 Simulationsansätze zur Erfassung des Carbon Footprint	44
6 Datenmodell	49
6.1 Modellierung	49

6.2	Berechnungsansatz	52
6.2.1	Transportkante	52
6.2.2	Transportknoten	55
6.2.3	Zusammenfassung	57
7	Allokation	61
7.1	Definition	61
7.2	Allokationsparameter	63
7.2.1	Stückzahl	63
7.2.2	Volumen	64
7.2.3	Gewicht	65
7.3	Allokationsmethodik	66
7.3.1	Transportknoten	66
7.3.2	Transportkante	69
8	Fazit und Ausblick	78
	Literaturverzeichnis	87
	Abbildungsverzeichnis	88
	Tabellenverzeichnis	89
	Abkürzungsverzeichnis	90
	Formelzeichen	92

1 Einleitung

Die verstärkte anthropogene Emission von Treibhausgasen gilt in der Wissenschaft mit als Auslöser für die globale Erderwärmung. Um die Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen, wird eine stabile Konzentration an Treibhausgasen in der Atmosphäre angestrebt. Durch die Klimarahmenkonvention werden Klimaschutzziele zur Begrenzung von Treibhausgasen gesetzt.

Das Interesse hat der Gesellschaft an klimafreundlichen Produkten und Dienstleistungen zugenommen. Auf Kundenseite wird von den Herstellern und Dienstleistern immer mehr umweltfreundliche Produkte gefordert, die eine gute Energie- und Emissionsbilanz aufweisen. Auf der anderen Seite stellt für Unternehmen Umweltfreundlichkeit einen wichtigen Kosten- und Wettbewerbsvorteil dar, sowie wird eine soziale, ökonomische und ökologische Verantwortung erwartet. Die Kunden besitzen durch ihr Konsumverhalten eine Einflussmöglichkeit, dass Unternehmen durch eine klimafreundliche Handeln zum Umweltschutz beitragen. Um die Klimaverträglichkeit für den Lebenszyklus von Produkten und Dienstleistungen zu messen, wird eine standardisierte Methode benötigt, die eine standardisierte Vorgehensweise zur Erfassung von Treibhausgasemissionen beschreibt. Mit dem Life Cycle Assessment und dem Carbon Footprint (CO₂-Fußabdruck) existieren Methoden um Umweltwirkungen bzw. die Emission von Treibhausgasen für ein Produktsystem zu ermitteln.

e-save Projekt [Pro13, vergl.]

Die Zielsetzung des e-Save Projektes, was im Rahmen der Europäischen Kommission gegründet wurde, ist es eine energieeffiziente Supply-Chain in der Logistik zu erreichen. Dazu sollen Systeme, Dienstleistungen, Kollaborationsplattformen und Anwendungen bereitgestellt und Methoden entwickelt werden, die es Unternehmen ermöglicht, den Energieverbrauch und die Emission von Treibhausgasen zu erfassen, zu überwachen, zu vergleichen und die Klimafreundlichkeit der Prozesse in der Logistikkette zu verbessern. Des Weiteren soll es operative und strategische Entscheidungen hinsichtlich der Umweltfreundlichkeit von Produkten und Dienstleistungen erleichtern. Der Fokus liegt bei der Klimafreundlichkeit und Energieeffizienz von Prozessen in der Supply-Chain, speziell die Erfassung von Treibhausgasen wie Kohlenstoffdioxid (CO₂). Das Projekt untersucht speziell den Sektor von Konsumgütern des täglichen Bedarfs (Fast Moving Consumer Goods) und bezieht die Organisation ECR Europe, die große Hersteller und Händler der Konsumgüterbranche vertritt, mit ein. Langfristig wird ein Umweltlabel angestrebt, was für Produkte und Prozesse erstellt wird und den Energieverbrauch und den kumulierten Treibhausgasausstoß eines Produktes angibt, welcher im Verlauf des Produktlebenszyklus freigesetzt worden ist. Die Entwicklung und der Einsatz eines Simulationsmodell mit standardisierten Berechnungsmethoden zur Erstellung eines Carbon Footprint für Konsumgüter innerhalb der Supply Chain wird angestrebt. Erforderliche Daten für Energieverbräuche und anderen Umweltkennzahlen sollen für die Supply-Chain erfasst werden und als Information genutzt werden, um Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der Emission von Treibhausgasen zu erzielen. Ein Teilgebiet des Projektes ist die Entwicklung und

Nutzung von Anwendungen zur Energie-Beobachtung, Ökobilanz und Simulation. Mit Hilfe der Simulation soll die Berechnung des Treibhausgasemissionen für den Abschnitt der Supply-Chain von fertig verpackten Artikeln im Ausgangslager der Fabrik bis zum Einzelhändler erfolgen. [Pro13, vergl.]

Projektziele:

- Entwicklung von Anwendungen zur Erfassung und Zuweisung von Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen zu Prozessen und Produkten der Supply Chain
- Automatische Erfassung von der Energieeffizienz bei Prozessen
- Kommunikation und Austausch von Energieprozessdaten
- Bereitstellung von Werkzeugen zur
- Simulation von variablen Supply-Chain-Szenarien unter Berücksichtigung von Umweltkennzahlen
- Dynamisches Energie-Effizienz-Label auf Produkte und für Dienstleistungen zur Information von Kunden

1.1 Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit

Die Untersuchung des Carbon Footprint entlang des Produktlebenszyklus wird auf den Abschnitt der Distributionslogistik innerhalb der Supply-Chain begrenzt. Das bedeutet, dass der Weg für den Verkauf gedachten fertig verpackten Produkten im Ausgangslager einer Fabrik bis hin zur letzten Händlerdistributionsstufe, zum Beispiel der Einzelhandel, betrachtet wird. Der Fokus bei den Produkten liegt bei den schnelldrehenden Konsumgütern des täglichen Bedarfs (Fast Moving Consumer Goods). Somit werden der Produktions- und Herstellungsprozess des Produktes und vorherige Prozesse wie die Rohstoffgewinnung nicht als Bestandteil der Untersuchung angesehen. Des weiteren wird der Verbrauch und die Benutzung des Produktes beim Endkunden, sowie spätere Entsorgungsprozesse nicht in die Ermittlung des Carbon Footprint berücksichtigt. Die Aspekte wie Ökonomie und Soziales des Nachhaltigkeitsdreieck werden nicht betrachtet. Der Bereich Ökologie begrenzt sich alleinig auf die Erfassung der Treibhausgasemissionen. Andere Umweltwirkungen werden nicht berücksichtigt. Das Ziel ist die Entwicklung eines standardisierten Simulationstool für die Berechnung des Carbon Footprint für die Distributionslogistik von Fast Moving Consumer Goods. Mit dem Simulationsprogramm soll ermöglicht werden, verschiedene Szenarien eines dynamischen Distributionssystems zu untersuchen und verschiedene Produktsysteme, Dienstleistungen und Produkte miteinander in ihrer Umweltfreundlichkeit zu vergleichen. Mögliche Erweiterungen hinsichtlich weiterer Phasen der Supply-Chain des Modells können bei korrekter Funktionsweise des Basismodells in Zukunft implementiert werden.

Zur Erfassung der Treibhausgasemissionsquellen entlang der Distributionslogistik werden detailliert die **Transport- und Lagerprozesse** eines Produktes analysiert. [WTT87,

vergl.] Der innerbetriebliche Transport und Umschlagsprozesse in Lager und Umschlagspunkten werden nur rudimentär betrachtet. Hierbei ist von Bedeutung, inwiefern die einzelnen Teilprozesse sich auf den Carbon Footprint des Produktsystems auswirken. Ist der Modellierungsaufwand sehr hoch, können für Prozesse Vereinfachungen und Annahmen getroffen werden.

1.2 Anforderungen

Bisherige Methoden und Ansätze zur Ermittlung von Umweltwirkungen oder der Erfassung von Treibhausgasemissionen wie der LCA-Ansatz oder die Methode des Carbon Footprint sind für statische Produktsysteme geeignet, wo zu einem festen Zeitpunkt die Erfassung der Daten durchgeführt wird. Für die Untersuchung der Distributionslogistik als dynamisches variables System ist die Simulation ein geeignetes Werkzeug zur Durchführung eines Carbon Footprint. Die Ermittlung des Carbon Footprint beruht auf der Grundlage die Treibhausgasemissionen eines Produktsystems zu erfassen. Für das zu untersuchende System müssen dazu die Treibhausgasquellen identifiziert werden. Die Berechnung der Treibhausgasemissionen kann über den Energieverbrauch für die Prozesse im System ermittelt werden und dann über Emissionsfaktoren in die Vergleichseinheit der CO₂-Äquivalenten umgerechnet werden. Der Aufwand zur Entwicklung eines Simulationsmodells im Rahmen einer Simulationsstudie ist hoch. Es wird daher eine Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit des Modells angestrebt, sodass es zur Untersuchungen verschiedener Szenarien verwendet werden kann und die Ergebnisse zum Carbon Footprint von Produkten und Dienstleistungen miteinander verglichen werden können.

Als Anforderung des Simulationsmodells für die Distributionslogistik wird festgelegt, dass die Energieverbräuche bereits in CO₂e pro Entfernungseinheit für Transportprozesse und CO₂e je Zeiteinheit für Lagerprozesse vorhanden sind. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, muss vorab zur Bereitstellung der benötigten Eingangsdaten Energieverbräuche in CO₂e umgerechnet werden.

Eine Beschreibung von Optimierungsmethoden für bestimmte Kennzahlen, zum Beispiel eine Optimierung der Distributionsroute hinsichtlich dem niedrigsten Carbon Footprint, sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Bei der Modellierung wird untersucht, welche Elemente der Distributionslogistik einen relevanten Einfluss auf den Carbon Footprint haben. Der angewendete Detaillierungsgrad in der Umsetzung des Carbon Footprint in ein Simulationsmodell wird so angesetzt, dass die Berechnung in ausreichender, der Realität angemessenen Genauigkeit, möglich ist. Der oftmals verwendete LCA-Ansatz besitzt eine hohe Genauigkeit bei der Untersuchung von statischen Systemen, wo zu einem festen Zeitpunkt genau ein Szenario analysiert wird. In der Form ist der LCA-Ansatz zur Untersuchung eines dynamischen Systems wie der Distributionslogistik ungeeignet. Bisherige Simulationsansätze berücksichtigen gar nicht oder kaum die Erfassung von Treibhausgasemissionen in einem dynamischen System. Daher wird ein mit Hilfe eines Datenmodells, einem Berechnungsansatzes und die Implementierung in ein Simulationsmodell eine Möglichkeit zur Berechnung des Carbon Footprint, speziell für die Distributionslogistik von Fast Moving Consumer Goods, entwickelt. In Zukunft ist eine Standardisierung der Me-

thode geplant, sodass für verschiedene Szenarien eines Produktsystems in der Logistik die Treibhausgasemissionen artikelspezifisch ermittelt und miteinander verglichen werden können. Über Modellparameter werden verschiedene Szenarien des Produktsystems und Eigenschaften definiert. Das entwickelte Modell berücksichtigt die Prozesse des realen Systems, die zur Emission von Treibhausgasemissionen beitragen, wie zum Beispiel Transport- und Lagerprozesse. Zur Berechnung werden Eingangsdaten benötigt, die aus verschiedenen Datenquellen bezogen werden können. Die Ausgangsgrößen des Simulationsmodells stellen den Umwelteinfluss für jeden Artikel in Bezug zu Klimaschädlichkeit in Kohlendioxid-Äquivalenten (CO₂e) dar.

1.3 Inhalt und Übersicht

Die Arbeit unterteilt sich mit Einleitung und dem Fazit in acht große Kapitel.

1. Einleitung
2. Darstellung von Methoden zur Erfassung von Umweltwirkungen
3. Elemente und Struktur der Distributionslogistik
4. Identifikation von Emissionsquellen in der Distributionskette
5. Simulation
6. Entwicklung eines Datenmodells
7. Vorstellung Allokationsmethodik
8. Zusammenfassung und Ausblick

Kapitel 2 Methoden zur Erfassung von Umweltwirkungen

Im zweiten Kapitel werden die beiden Methoden des Life Cycle Assessment (Ökobilanz) und der Carbon Footprint (CO₂-Fußabdruck) zur Erfassung von Umweltwirkungen beschrieben. Beide Methoden werden auf Grundlage der international standardisierten Normen der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erklärt. Im Rahmen dessen werden die Phasen *Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens*, *Sachbilanz*, *Wirkungsabschätzung* und *Auswertung* eingegangen und zum Schluss ein kurzer Vergleich zu Simulation gezogen.

Kapitel 3 Distributionslogistik

Im dritten Kapitel "Distributionslogistik" werden die Elemente und Strukturen eines Distributionssystems erläutert. Dabei wird auf die Prozesse Transport und Lagerung eingegangen. Als spezielle Produktgruppe wird die Distribution von Fast Moving Consumer Goods (schnelldrehenden Konsumgütern) und deren speziellen Anforderungen beim Transport, Umschlag und Lagerung beschrieben.

Kapitel 4 Emissionsquellen in der Distributionskette

Im vierten Kapitel werden die Emissionsquellen für Treibhausgase entlang der Distributionskette identifiziert und in Kategorien strukturiert. Dabei wird untersucht wie sich der Energieverbrauch für den Transport und während der Lagerung zusammensetzt und inwiefern eine Umrechnung in Kohlendioxid-Äquivalente erfolgt. Für den Transport wird das Distributionssystem nach Transportmittel: Straßenverkehr, Schienenverkehr, Luftverkehr, See- und Binnenschiffsverkehr unterschieden. Des Weiteren werden die Treibhausgasemissionen identifiziert, die beim Lagerungsprozess von Gütern entstehen.

Kapitel 5 Simulation

Im sechsten Kapitel werden die Grundlagen der Simulation erklärt. Es wird die Ereignisdiskrete Simulation (DES) als Möglichkeit zur Berechnung des Carbon Footprint für ein dynamisches System erläutert und auf bestehende Simulationsansätze zur Durchführung eines LCA oder CFP in der Wissenschaft eingegangen.

Kapitel 6 Datenmodell

Im sechsten Kapitel wird die Umsetzung des realen Systems in ein Modell erläutert. Dabei wird beschrieben, welche Komponenten in welchem Detailgrad umgesetzt werden werden. Bei der Entwicklung des Datenmodells wird eine Abstraktion des realen Systems in Modellkomponenten durchgeführt und Parameter und Attribute des Modells definiert, die für die Berechnung des Carbon Footprint erforderlich sind.

Kapitel 7 Allokation

Im siebten Kapitel wird beschrieben, wie die zuvor für Transport- und Lagerprozesse berechneten Kohlendioxid-Äquivalente zu den einzelnen Artikel zugewiesen werden können. Dabei wird auf die drei Allokationsmethoden nach Gewicht, Volumen und Stückzahl eingegangen und deren Einfluss auf das Simulationsergebnis beschrieben. Des Weiteren wird erklärt, wann eine Allokation notwendig ist und inwiefern besondere Bedingungen und Eigenschaften entlang der Distributionskette berücksichtigt werden.

Kapitel 8 Fazit und Ausblick

Im letzten Kapitel der Arbeit wird nochmal der Modellierungsprozess des realen Systems der Distributionslogistik bis hin zum Simulationsmodell beschrieben. Es wird beantwortet, wie sich der Carbon Footprint für ein Distributionssystem berechnen lässt und auf welche Weise eine Allokation zu den Artikeln erfolgt. Die Zielstellung der Simulation einen produktspezifischen CO₂-Fußabdruck für ein Distributionsnetzwerk zu erhalten wird beschrieben und zum Abschluss zusammengefasst. Am Ende der Arbeit erfolgt ein kurzer Ausblick, inwiefern das Simulationsmodell noch weiterentwickelt werden kann.

2 Methoden zur Erfassung von Umweltwirkungen

2.1 Life Cycle Assessment

Die Methode des Life Cycle Assessment wird auf Grundlage der beiden internationalen Normen EN ISO 14040 und EN ISO 14044 beschrieben. Beide Normen wurden auf europäischer Ebene entwickelt und von der CEN, dem europäischen Komitee für Normung, am 19. Juni 2006 angenommen. Für die CEN-Mitgliedsländer sind die Normen verbindlich und müssen durch die Normungsbehörden des jeweiligen Mitgliedslandes ohne Veränderung den Status einer nationalen Norm erhalten. Für Deutschland wurden die deutschen Fassungen durch den DIN-Nagrus umgesetzt. Das Life Cycle Assessment, kurz LCA-Ansatz genannt, wird in der deutschen Fassung als Ökobilanz bezeichnet. Die beiden internationalen Normen 14040/14044 zur Ökobilanz werden der ISO-Normreihe 14000 des Umweltmanagements zugeordnet und unterscheiden sich inhaltlich:

DIN ISO 14040 Anzuwendende Grundsätze und Rahmenbedingungen

DIN ISO 14044 Anforderungen und Anleitungen der Ökobilanz

Die Ökobilanz wird in der DIN ISO-Norm als „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges.“[DIN09, S.11] definiert. „Die Ökobilanz ist eine iterative Methode zur Abschätzung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte und produktspezifischen potenziellen Umweltwirkungen [...] Die Ökobilanz-Studie untersucht die Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen im Verlauf des Lebenswegs eines Produktes (d.h. von der Wiege bis zur Bahre) von der Rohstoffgewinnung, über Produktion, Anwendung bis zur Beseitigung“[KG09, S.2] Mit der Ökobilanz wurde eine Methode entwickelt, um Umweltwirkungen von Produkten entlang ihres Produktlebenszyklus zu ermitteln und zu untersuchen. Die Ökobilanz kann die Entwicklung und Verbesserung von Umwelteigenschaften bei Produkten und Dienstleistungen unterstützen. Unternehmen können umweltschädliche Prozesse oder Produkte durch umweltfreundlichere ersetzen. Durch das steigende Umweltbewusstsein innerhalb der Gesellschaft und der damit verbundene höhere Druck auf Unternehmen, umweltfreundlich zu handeln, ist es für strategische Entscheidungen der Unternehmen entscheidend, die Umweltwirkungen zu analysieren und zu berücksichtigen. Im Marketing kann durch Entwicklung von Umweltlabels auf den Produkten und bei Dienstleistungen die Umweltfreundlichkeit nach außen präsentiert werden. Umweltfreundlichkeit entwickelt sich immer mehr zu einem Wettbewerbsvorteil, sodass Unternehmen ein stärkeres Interesse daran zeigen. Die Methode kann bei der Auswahl relevanter Umweltindikatoren und deren Messverfahren hilfreich sein. Beim LCA-Ansatz werden Umwelteigenschaften eines bestimmten Produktsystems und deren Input- und Outputflüsse ermittelt. Das Produktsystem wird in eine Anzahl von Prozessmodulen untergliedert, die untereinander über Zwischenproduktflüsse in Beziehung stehen. Neben den Wechselwirkungen zwischen den Prozessmodulen werden für jedes Prozessmo-

dul Input- und Outputflüsse bestimmt. Für das Produktsystem werden Elementar- und Produktflüsse untersucht. [DIN06, DIN09, vergl.]

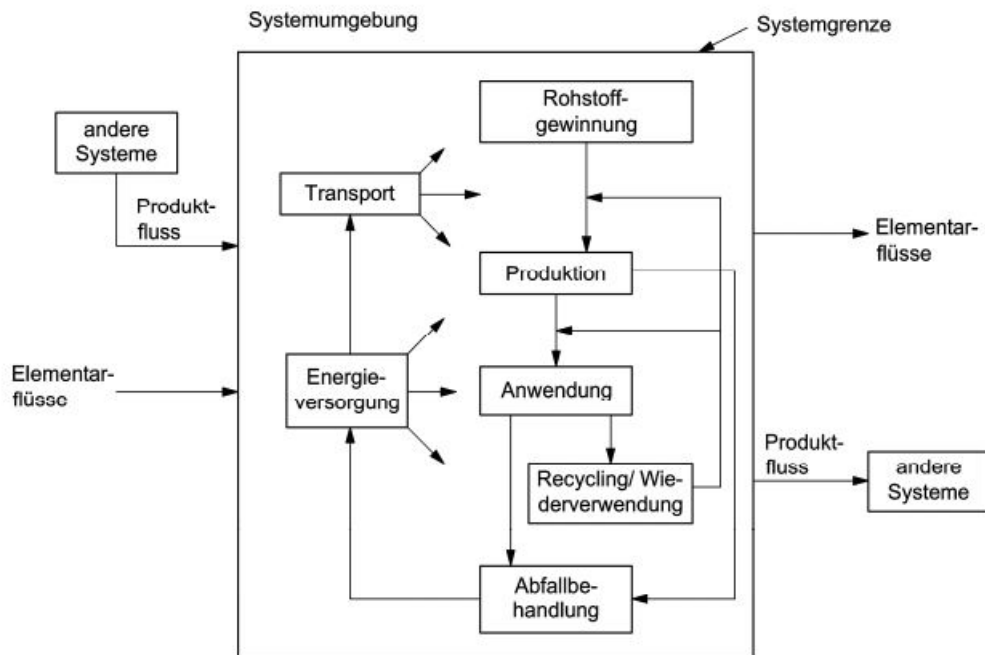


Abb. 2.1: Beispiel Produktsystem LCA-Ansatz [DIN09, S. 16]

Das Produktsystem wird durch die Systemgrenze zur Systemumgebung nach außen abgegrenzt. Im Produktsystem wird der Lebensweg von Produkten und Dienstleistungen von der Rohstoffgewinnung, Produktion, Anwendung, Recycling bis hin zur Entsorgung oder Wiederverwendung betrachtet. Das Produktsystem erklärt sich durch die Funktion, die es erfüllt. Des Weiteren werden für das Produktsystem Prozesse, beispielsweise der Transport und die Energieversorgung in die Untersuchung mit einbezogen. Input- und Outputströme wie Produkt- und Elementarflüsse, die die Systemgrenze überschreiten werden untersucht. Elementarflüsse sind Stoffe und Energie, die der Umwelt ohne Eingriff des Menschen entnommen oder hinzugefügt werden. Damit verbunden gehört die Nutzung von Rohstoffen und die Emissionen in Luft, Wasser und Boden. Beim Produktfluss werden Produkte aus oder in ein anderes Produktsystem getauscht.

Die vier Phasen des Life Cycle Assessment [DIN06, vergl.]

1. **Festlegung des Zielrahmens:** Ziel und Problemdefinition des LCA
2. **Sachbilanz:** Zusammenstellung und Quantifizierung von Input- und Outputströmen
3. **Wirkungsrahmen:** Beurteilung der Größe und Bedeutung von Umweltwirkungen
4. **Auswertung:** Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Enthält eine Ökobilanz nicht die Phase der Wirkungsabschätzung, so wird die Studie als Sachbilanz bezeichnet. Von dem Nachhaltigkeitsdreieck, den drei verschiedenen Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales, berücksichtigt die Ökobilanz nur den Teil

Ökologie. Eine Ökobilanz betrachtet die Umweltwirkungen und Umweltaspekte eines Produktsystems und kann für jedes Produkt und jede Dienstleistung durchgeführt werden. Zu den Dienstleistungen gehören zum Beispiel Transporte, die für die Untersuchung der Distributionslogistik relevant sind. Die Methode beinhaltet die Untersuchung des gesamten Lebenszyklus eines Produktes. Das bedeutet, dass von der Rohstoffgewinnung, Material- und Produktherstellung bis hin zur Beseitigung bilanziert wird. Die Umweltwirkungen werden in den einzelnen Prozessen und Abschnitten des Produktlebenszyklus untersucht. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Carbon Footprint für ein Produktsystem beschrieben, der ein Abschnitt und eine Teiluntersuchung des Life Cycle Assessment darstellt.

2.2 Carbon Footprint

2.2.1 Definition

Im Gegensatz zur Methodik des Life Cycle Assessment untersucht der Ansatz des Carbon Footprint nur die Emission und den Entzug von Treibhausgasen (THG) gegenüber der Erdatmosphäre und besitzt damit nur die Wirkungskategorie Klimawandel. Der LCA-Ansatz betrachtet dagegen alle Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen eines Produktes, zum Beispiel einer Ware oder einer Dienstleistung, entlang des Lebensweges von der Entstehung bis zum Ende des Produktes.[DIN12, vergl. S.7] Der Carbon Footprint, auch als CO₂-Fußabdruck und CO₂-Bilanz bezeichnet, entspricht einem Life Cycle Assessment, wobei der Fokus nur bei der Untersuchung und Erfassung der Treibhausgase eines Produktsystems liegt. Die Norm ISO 14067 der internationalen Organisation für Normung (ISO) beinhaltet „Anforderungen und Leitlinien zur Quantifizierung und Kommunikation des Carbon Footprint“. Zum Zeitpunkt der Arbeit befindet sich die internationale Norm noch in der Entwicklungsphase, sodass die Methodik des Carbon Footprint auf Basis der deutschen Entwurfsversion DIN ISO 14067 (Stand November 2012) beschrieben wird. Die Grundlage für den Carbon Footprint nach ISO 14067 stellen die beiden Normen ISO 14040 und ISO 14044 dar, in denen die Grundsätze der Ökobilanz-Methodik beschrieben sind. Der Carbon Footprint eines Produktes definiert sich auf der Grundlage der DIN ISO 14067 als „Summe der Treibhausgasemissionen und des Treibhausgasentzugs in einem Produktsystem, angegeben als CO₂-Äquivalent und beruhend auf einer Ökobilanz, unter Nutzung der einzelnen Wirkungskategorie Klimawandel“[DIN12, S.9] „Der Product Carbon Footprint bezeichnet die Menge der Treibhausgasemissionen entlang des gesamten Lebenszyklus eines Produkts in einer definierten Anwendung und bezogen auf eine definierte Nutzeinheit.“[Bun09] Bei der Ermittlung der Emission von Treibhausgasen wird die Masse der freigesetzten Treibhausgase in die Atmosphäre betrachtet, bei dem Entzug entsprechend die Masse, die aus der Atmosphäre entzogen wird. Ein Treibhausgas ist ein „gasförmiger Bestandteil der Atmosphäre, sowohl natürlichen als auch anthropogenen Ursprungs, der die Strahlung bei spezifischen Wellenlängen innerhalb des Spektrums der infraroten Strahlung, die von der Erdoberfläche, der Atmosphäre und den Wolken abgegeben wird, aufnimmt und abgibt“[DIN12, S.11] Eine höhere Konzentration von Treibhausgasen in der Erdatmosphäre führt zu einem Treibhauseffekt. Ver-

stärkt sich der Treibhauseffekt, dann kommt es zu einem Anstieg der durchschnittlichen Temperatur in der Erdatmosphäre. Eine Veränderung der Temperatur kann zu weitreichenden klimatischen Veränderungen führen. Es wird daher angestrebt, den Ausstoß von anthropogenen, sprich durch den Menschen verursachten, Treibhausgasen zu reduzieren und klimatische Schäden und Veränderungen zu verhindern. Das am 11. Dezember 1997 verabschiedete Kyoto-Protokoll der „United Nations Framework Convention on Climate Change“ (UNFCCC) definiert sechs Treibhausgase, für die eine Reduzierung der anthropogenen Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalenten erzielt werden soll. [Uni98][Uni13] Die zu erfassenden Treibhausgase werden im Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) als Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (H-FKW/HFCs), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFCs) und Schwefelhexafluorid (SF₆) benannt.

Tab. 2.1: Treibhauspotenzial für ausgewählte Treibhausgase [Pie07, S.85/213]

Bezeichnung	chemische Formel	GWP 100 Jahre	Lebensdauer [a]
Kohlendioxid	CO ₂	1	variabel
Methan	CH ₄	25	12
Distickstoffoxid	N ₂ O	298	114
FCKW	z.B. CClF ₃	14400	640
FKW	z.B. CHF ₃	14800	270
Schwefelhexafluorid	SF ₆	22800	3200

Die einzelnen Treibhausgase besitzen ein unterschiedlich starkes Treibhauspotenzial. Im Englischen wird der Begriff „global warming potential“ verwendet und mit GWP abgekürzt. Ein höheres Treibhauspotenzial bedeutet, dass das Treibhausgas einen stärkeren Effekt auf die Klimaerwärmung bewirkt und somit klimaschädlicher im Vergleich zu Gasen mit einem niedrigeren Treibhauspotenzial ist. Für Kohlenstoffdioxid (CO₂) wurde ein Treibhauspotenzial von eins festgelegt und stellt damit die Vergleichsbasis zu allen anderen Treibhausgasen dar. Die verstärkte Wärmewirkung innerhalb der Erdatmosphäre von bestimmten Treibhausgasen wird somit durch die Maßzahl des Treibhauspotentials (GWP) als Faktor in Bezug zu Kohlenstoffdioxid masse- und zeitbezogen beschrieben. Wie stark die einzelnen Treibhausgase zur Erderwärmung beitragen, wird für einen bestimmten Zeithorizont von zum Beispiel 20, 100 oder 500 Jahren bestimmt. Treibhausgase, die eine hohe Verweildauer in der Erdatmosphäre besitzen, tragen für diesen Zeitraum für einen erhöhten Treibhauseffekt bei. Es ist daher besonders die Emission von Treibhausgasen mit einem hohen Treibhauspotential und einer hohen Verweildauer in der Atmosphäre zu vermeiden. Für die Treibhauspotenziale sind je nach Quelle verschiedene Werte für das gleiche Treibhausgas angegeben. Neben den im Kyoto-Protokoll angegebenen GWP-Werten von den Vereinten Nationen aus dem Jahre 1997, gibt es aktuelle Vorgaben des Weltklimarates, dem Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), die als Standard angesehen werden und als Referenzwerte verwendet werden. Ein Beispiel dafür ist, dass das Treibhausgas Methan ein Treibhauspotenzial mit einem Faktor von 25 für den Zeitraum von 100 Jahren (Quelle IPCC 2007) besitzt. Bei einem Vergleich der Treibhauswirkung von einem Kilogramm Methan mit einem Kilogramm Kohlenstoffdioxid für eine Zeitperiode von hundert Jahren, besitzt Methan eine um diesen Faktor höhere Wirkung

auf den Treibhauseffekt. Der Ausstoß von einem Kilogramm Methan in die Atmosphäre entspricht demnach der Treibhauswirkung, die eine Emission von 25 Kilogramm Kohlenstoffdioxid bewirken würde. Das Ergebnis des Carbon Footprint beziehungsweise die Menge an Treibhausgasemissionen (THG) wird in Kohlendioxid-Äquivalenten (CO₂e) angegeben. Vereinfacht lässt sich die Kennzahl Kohlendioxid-Äquivalent (CO₂e) als Multiplikation des Treibhauspotenzials (GWP) mit der spezifischen Menge des Treibhausgases, die als Masseneinheit angegeben wird, darstellen. [DIN12, Pie07, vergl.]

$$CO_2e = GWP_{THG} \cdot m_{THG}$$

Das CO₂-Äquivalent einer spezifischen Menge eines Treibhausgases wird als Masse eines gegebenen Treibhausgases, multipliziert mit dessen Treibhauspotential, berechnet und ist eine Vergleichseinheit um die verstärkte Strahlung eines Treibhausgases im Verhältnis zu Kohlenstoffdioxid darstellen zu können. [DIN12] Durch die Umrechnung der Treibhausgasemissionen in die einheitliche Einheit des Kohlendioxidäquivalents CO₂e wird es ermöglicht die Klimafreundlichkeit von Dienstleistungen und Produkten gegenüber zu stellen und miteinander zu vergleichen. In der Literatur werden verschiedene Abkürzungen wie zum Beispiel CO₂-äq, CO₂-eq oder CO₂e für das Kohlendioxid-Äquivalent angegeben. In der vorliegenden Arbeit wird das Kohlendioxid-Äquivalent nach ISO 14067 mit **CO₂e** abgekürzt.

Tab. 2.2: Definition Kohlendioxid-Äquivalent [Pie07, DIN12, vergl.]

Name	int. Name	Formelzeichen	Einheit	Dimension
CO ₂ -Äquivalent	carbon dioxide equivalent	CO ₂ e	CO ₂ e kg	M

Für ein definiertes Produktsystem oder eine Dienstleistung werden die sechs benannten Treibhausgasemissionen erfasst und über Faktoren in Kohlendioxid-Äquivalente umgerechnet. In der Einheit der Kohlendioxid-Äquivalente ist eine Summierung und die Vergleichbarkeit in dieser Einheit verschiedener Produkte gegeben. Die Zielsetzung der internationalen Norm ISO 14067 ist es, als standardisierten Methode die Erfassung, Quantifizierung, Bewertung und Verifizierung von Emissionen in die Atmosphäre und den Entzug von Treibhausgasen aus der Atmosphäre zu ermöglichen. Durch die Anwendung der Methode des CO₂-Fußabdruckes soll die Identifizierung von Treibhausgasquellen erleichtert, Möglichkeiten zur Treibhausgasreduzierung aufgezeigt und eine Bewertung des Produktsystems vorgenommen werden können. Berücksichtigt werden muss, dass der Carbon Footprint durch die Limitation der Untersuchung auf Treibhausgase nur ein begrenztes Mittel zur Bewertung der Umweltfreundlichkeit eines Produktes oder einer Dienstleistung ist. Entsprechend nach dem vorliegenden Anwendungsfall kann die Anwendung einer anderen Methode zur Untersuchung der Umweltauswirkungen eines Szenario vorteilhaft sein. Für die umfassende Untersuchung von Umweltaspekten ist der LCA-Ansatz vorzuziehen. Sind soziale und ökonomische Aspekte von Bedeutung, so können erweiterte Methoden des Life Cycle Assessment genutzt. Wie beim LCA-Ansatz wird der sogenannte Lebenszyklus eines Produktes von der "Wiege zur Bahre" beim Carbon Footprint untersucht. Soll für ein Pro-

duktsystem die Treibhausgasemissionen untersucht werden, stellt der Carbon Footprint eine geeignete Methode dar.

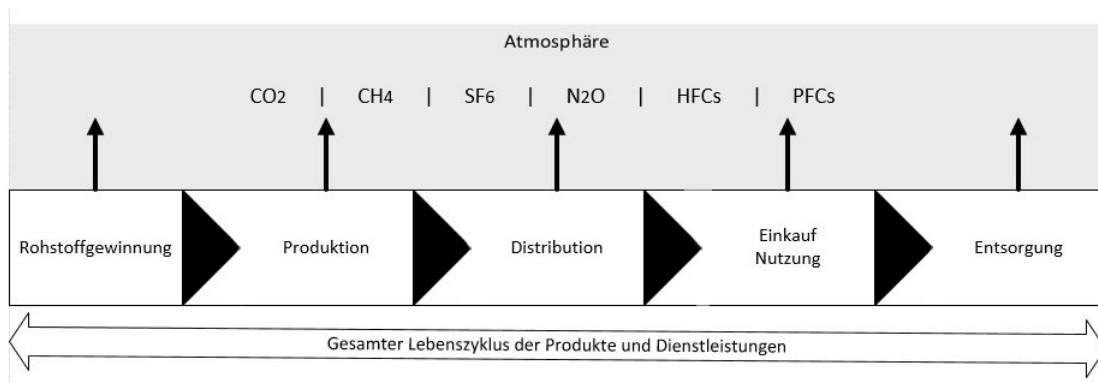


Abb. 2.2: Treibhausgasemissionen für den kompletten Lebenszyklus [Wüt10, vergl. S.3][Chr09]

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Erfassung und Berechnung des Carbon Footprint auf den Lebensabschnitt der Distribution begrenzt. Hierbei liegt der Fokus auf der Untersuchung der Klimaverträglichkeit für Prozesse in der Distributionslogistik und dem Transport von Konsumgütern von der Quelle bis zur Senke. Die Quelle der Distributionskette liegt im Ausgangslager einer Produktionsstätte, wo die fertig verpackten Konsumgüter lagern und von dort über verschiedene Wege bis zum Endhändler transportiert werden. Die Methodik des Carbon Footprint beinhaltet wie der LCA-Ansatz vier Phasen zur Untersuchung. Im Folgenden werden die Phasen beschrieben und die Implementierung dieser Phasen in eine Simulationsstudie zur Untersuchung des Carbon Footprint beschrieben.

2.2.2 Phasen des Carbon Footprint

In den Methoden zur Durchführung eines Life-Cycle-Assessments (ISO 14040/44) und einer CFP-Studie (ISO 14067) werden die folgenden vier Phasen unterschieden:

Phasen des Carbon Footprint [DIN12, vergl. S.23]

1. Festlegung des Zieles und des Untersuchungsrahmens
2. Sachbilanz (Datensammlung)
3. Wirkungsabschätzung
4. Auswertung (Interpretation des Ergebnisses)

1. Festlegung des Untersuchungsrahmen

In der ersten Phase des Carbon Footprint wird beschrieben, welches Ziel bei der CFP-Studie angestrebt wird. Bei der Bestimmung der Zielsetzung in der CFP-Studie muss erkenntlich gemacht werden, warum die Studie durchgeführt wird, was der Anwendungszweck ist und an wen die Ergebnisse gerichtet sind. „Das Ziel der Durchführung einer CFP-Studie besteht darin, durch quantitative Bestimmung der THG-Emissionen und des THG-Entzugs im Verlauf des Lebensweges eines Produkts den potentiellen Beitrag dieses

Produkts zur Erderwärmung zu berechnen, angegeben als CO_2e “[DIN12, S.25] Zur Festlegung des Untersuchungsrahmens wird das zu untersuchende Produktsystem und dessen Funktionen beschrieben. Unter einem Produktsystem versteht man die „Zusammenstellung von Prozessmodulen mit Elementarflüssen und Produktflüssen, die den Lebensweg eines Produktes modelliert und die eine oder mehrere festgelegte Funktionen erfüllt“[DIN12, S.23]“. Für das Produktsystem wird eine Systemgrenze definiert. Hierbei wird angegeben, welche Prozessmodule innerhalb der CFP-Studie untersucht werden und welche nicht berücksichtigt werden. Vorgenommene Entscheidungen entlang einer CFP-Studie werden begründet und es ist zu überprüfen, ob zu jedem Zeitpunkt eine Übereinstimmung mit der Zielsetzung des Carbon Footprint vorliegt. Im Rahmen des Produktsystems wird eine funktionelle Einheit angegeben, auf die sich alle Inputs und Outputs beziehen und quantifizieren lassen. Werden Prozesse, Abschnitte des Produktlebens, Inputs oder Outputs nicht untersucht, also dem Produktsystem nicht zugeordnet, muss diese Abgrenzung durch den Anwender begründet werden. Des Weiteren muss erläutert werden, welche Prozessmodule relevant sind, wie hoch der jeweilige Detaillierungsgrad der Prozesse anzusetzen ist und welche möglichen Auswirkungen das Hinzufügen oder das Entfernen von Prozessmodulen hat.

2. Sachbilanz

„Die Sachbilanz ist die Phase der Ökobilanz, die das Zusammentragen und die quantitative Bestimmung der Inputs und Outputs für ein Produkt im Verlauf seines Lebensweges umfasst“[DIN12, S.31] Das Produktsystem stellt den Lebensweg des Produktes dar und wird in Prozessmodule untergliedert, die wiederum die einzelnen Lebensabschnitte von Anfang bis zum Ende des Produktlebens darstellen. Abschnitte können zum Beispiel die Rohstoffgewinnung, Produktion, Verteilung, Anwendung und das Ende des Produktlebens sein. Für jeden Bereich werden die Treibhausgasemissionen erfasst und eine Zuordnung zu den Lebensabschnitten festgelegt. Die Phase beschreibt die Identifikation der Treibhausgasquellen entlang der einzelnen Lebensstufen eines Produktes von der Rohstoffgewinnung bis zur Beseitigung. Als Abschnitt des Produktlebenszyklus wird die Distribution als Produktsystem definiert und die Emission von Treibhausgasen bestimmt. Die Treibhausgasemissionen werden entlang der Distributionskette von fertig verpackten Konsumgütern ausgehend vom Ausgangslager der Produktion bis hin zum Endhändler, also vor der Nutzungsphase beim Endkunden, untersucht. Der Fokus bei der Erstellung des Carbon Footprint liegt besonders in der Identifikation der Treibhausgasquellen und die Bestimmung der Mengen an CO_2e -Emissionen. Es muss ein Verfahren zur quantitativen Bestimmung der Treibhausgasemissionen bestimmt werden und eine Allokation der Emissionen zu Prozessen und Objekten vorgenommen werden.

3. Wirkungsabschätzung

„In der Phase der Wirkungsabschätzung einer CFP-Studie sind die potentiellen Auswirkungen jedes durch das Produktsystem abgegebenen und entzogenen Treibhausgases auf die Klimaänderung durch Multiplizieren der Masse der abgegebenen und entzogenen Treibhausgase mit dem vom IPCC in Einheiten von *kg CO₂e je kg Emissionen* angegebenen

GWP100 zu berechnen“[DIN12, S.40] Die Phase der Wirkungsabschätzung wird durch Berücksichtigung der Treibhauspotenziale der einzelnen Treibhausgase beachtet. In den meisten Fällen wird bei standardisierten Methoden gemäß den internationalen Normen für den Carbon Footprint die Erfassung der Treibhausgasen auf sechs Treibhausgase begrenzt. Die Treibhauspotenziale werden wie empfohlen nach dem „Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change“ verwendet. [Pie07, vergl.]

4. Auswertung

In der vierten Phase wird die Auswertung der Ergebnisse des Carbon Footprint vorgenommen. Im Rahmen der Auswertungsphase werden die vorliegenden Ergebnisse des CFP beurteilt und dabei Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzüberprüfungen mit einbezogen. Die Ergebnisse des Carbon Footprint sind in Übereinstimmung mit den Phasen der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung und entsprechend dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen der CFP-Studie auszuwerten.

Für die Durchführung der Simulation können die Ergebnisse nach erfolgten Simulationen durchgängen bewertet werden und auf ihre Richtigkeit überprüft werden. Im Verlauf dieser Arbeit konnte noch keine Umsetzung des Berechnungsansatzes in ein Simulationsmodell und keine Experimente vorgenommen werden. Eine Erweiterung des Berechnungsansatzes und die Implementierung in ein Simulationsmodell, sowie die Untersuchung und der Vergleich von Simulationsergebnissen mit der Realität sind Bestandteile weiterer Arbeiten und Untersuchungen.

- qualitative und quantitative Bewertung der Unsicherheit
- Identifizierung und Dokumentation der vorgenommenen Allokationsverfahren
- Aufzeigen von möglichen Einschränkungen der CFP-Studie

Zum Schluss der Arbeit erfolgt die Auswertung des Berechnungs- und Allokationsansatzes und die Angabe von potenziellen Einschränkungen durch Verwendung der Simulation.

2.2.3 Verbindung von CFP- und Simulationsstudie

Ähnlich den vorgestellten Phasen einer CFP-Studie nach ISO 14067 wird ein Phasenmodell konzipiert, welches die Entwicklung und Verwendung eines Simulationsmodells innerhalb einer Simulationsstudie und die Durchführung einer Carbon Footprint-Studie für die Distributionslogistik miteinander verbindet. Analog zu der ISO 14067 wird in der ersten Phase das Ziel der CFP-Studie beschrieben und der Untersuchungsrahmen festgelegt. Das Ziel und der Untersuchungsrahmen wurden bereits in der Einleitung dieser Arbeit beschrieben. Es erfolgt eine Problemdefinition und eine Beschreibung, inwiefern mit Hilfe der Simulation eine Lösung und Umsetzung möglich ist.

In der zweiten Phase folgt die Systembeschreibung, in der das zu untersuchende Produktsystem (Distributionslogistik) beschrieben wird und die Emissionsquellen entlang der Distribution identifiziert werden. Die Phase der Modellentwicklung entspricht einer Umsetzung und Nachbildung des realen Systems der Distributionslogistik in einem Simulationsmodell.

Tab. 2.3: Phasenmodell zur Erstellung eines Simulationsmodell und Durchführung der CFP-Studie:

Nr.	Phase	Teilschritt CFP	Teilschritt Simulation
1	Festlegung Ziel und Untersuchungsrahmen	x	x
2	Systembeschreibung	x	x
3	Wirkungsabschätzung	x	
4	Modellentwicklung		x
5	Sachbilanz Datensammlung	x	x
6	Berechnung		x
7	Auswertung	x	x
8	Kommunikation	x	x

In den Phasen Sachbilanz und Datensammlung werden notwendige Parameter, Attribute und die Erzeugung und Bereitstellung von Datenquellen angegeben, die zur Berechnung des Carbon Footprint mit Hilfe der Simulation benötigt werden. Ein Berechnungsansatz und zugehörige Allokationsmethoden müssen entwickelt und beschrieben werden. Nach erfolgter Simulation wird die Auswertung und Kommunikation der Ergebnisse durchgeführt. Eine Kommunikation kann durch ein Klimalabel auf den Konsumgütern realisiert werden und dem Kunden die Klimafreundlichkeit vermitteln. In den meisten Fällen erfolgt die Erstellung des Carbon Footprint für den ganzen Lebenszyklus eines Produktes oder einer Dienstleistung. Im vorliegenden Fall beschränkt sich gemäß der Zielsetzung, die Erstellung eines Carbon Footprint mit Hilfe der Simulation auf den Produktlebensabschnitt der Distribution. Nach der Systembeschreibung der Distributionslogistik erfolgt eine Umsetzung in einem Simulationsmodell. Für das beschriebene System werden die Treibhausgasquellen im realen System identifiziert und eine Umsetzung in ein Simulationsmodell vorgenommen.

3 Distributionslogistik

3.1 Definition

Die Distributionslogistik definiert sich als: „Planung, Organisation und Durchführung von Prozessen der Warenverteilung zur jeweils nachgelagerten Wirtschaftsstufe bzw. zum Endverbraucher. Distributionslogistik beginnt in der Regel mit dem Abschluss der Produktion und endet mit der Bereitstellung der Güter beim Letztverbraucher oder -nutzer [KKK12, S.125]“. Distributionslogistik, auch als Absatzlogistik bezeichnet, ist ein Bestandteil der Versorgungslogistik, welche die Bereiche Beschaffung, Produktion und Distribution umfasst. Entlang der Wertschöpfungskette der Logistik werden die sechs Ziele, auch als 6R der Logistik bezeichnet, angestrebt:

6R der Logistik [Wan10, vergl. S.30]

1. Richtige Qualität
2. Richtige Produkt
3. Richtige Zeitpunkt
4. Richtige Menge
5. Richtige Ort
6. Richtige Kosten

Für die Distributionslogistik werden eine kurze Transportlaufzeit, minimale Lagerbestände, eine hohe Warenverfügbarkeit am Verkaufsort (Point of Sale) und geringe Transportkosten. [KKK12, S.126] Ein weiteres Ziel, was in der Zukunft an Bedeutung gewinnen wird, ist die umweltfreundliche Gestaltung der Distributionsprozesse. Die Umweltfreundlichkeit und Klimaverträglichkeit von angebotenen Produkten und Dienstleistungen stellt mehr und mehr eine wichtige Anforderung des Kunden dar, die von den Herstellern und Lieferanten als Wettbewerbskriterium berücksichtigt werden sollte und gegenüber anderen Marktteilnehmern einen Wettbewerbsvorteil darstellen kann. Bei der Klimaverträglichkeit liegt der Fokus hauptsächlich auf der Reduzierung von Treibhausgasen wie beispielsweise Kohlenstoffdioxid (CO₂), die entlang des Lebenszyklus eines Produktes in die Umwelt emittiert werden. Für die Logistik ist der Lebenszyklus eines Produktes vergleichbar mit der Supply-Chain-Kette, die als Versorgung- und Wertschöpfungskette eines Produktes, „Fertigungs- und Absatzstufen von der Rohstoffgewinnung über die Produktion bis hin zum Absatz an den Konsumenten [KKK12, S.549]“ umfasst. Im vorliegenden Fall wird der Abschnitt Distribution der Supply-Chain-Kette untersucht. Dazu gehören der Transport, der Umschlag und die Lagerung von Produkten im Abschnitt von der Produktion bis zum Endhändler. Ein Ziel der Distributionslogistik ist die Minimierung der Logistikkosten, wozu Auftragsabwicklung, Lager- und Transportkosten, Bestandskosten, Kosten für den Fuhrpark, System- und Steuerungskosten (IT) gehören. Die Kosten werden im späteren Modell nicht dargestellt, sondern der Fokus wird auf den Umweltaspekt gelegt. Auch eine Optimierung

hinsichtlich einem hohen Lieferservice, also eine kurze Lieferzeit und hohe Lieferzuverlässigkeit, wird vernachlässigt. Zielsetzung ist die Distributionslogistik in einem Modell mit einem bestimmten Detailgrad korrekt nachzubilden und variabel für ganz unterschiedliche Szenarien einen Carbon Footprint mit Hilfe der Simulation, speziell für Konsumgüter, zu berechnen. Die Distributionspolitik „beinhaltet alle Entscheidungen zur Ausgestaltung und zur Organisation des Weges eines Produktes von der Produktion bzw. vom Fertigwarenlager zum (End-)Abnehmer. Dies betrifft insbesondere die Wahl der Absatzkanäle (distribution channels) und die Organisation der physischen Distribution.[HHU11, S.240]“Die Auswahl der Absatzkanäle bzw. die Definition der Absatz- und Distributionswege wird der akquisitorischen Distribution beziehungsweise dem Vertrieb zugeordnet. Dazu gehören die Gestaltung von Vertriebsstrategien und Vertriebsprozesse als Bestandteil der Distributionspolitik. Dabei werden folgende Absatzwege unterschieden: [HHU11, vergl. S.241]

direkt (Nullstufenkanal): Transport von Produkten vom Hersteller zum Endabnehmer

indirekt (Einstufen- oder Mehrstufenkanal): Distribution über Absatzmittler

Die physische Distribution stellt den eigentlichen Warenfluss bzw. den aktuellen Transport für Produkte durch ein gegebenes Distributionsnetzwerk dar. Bevor die Verteilung von Gütern mit Hilfe eines Simulationsmodells umgesetzt werden kann, müssen die Bestandteile des Distributionsnetzwerkes erfasst und strukturiert werden. Im Folgenden werden die Elemente und Strukturen der Distributionslogistik vorgestellt, sowie bestimmte Distributionsstrategien erläutert. Nach Erfassung der Distributionsstruktur, kann eine Identifikation von Treibhausgasemissionsquellen entlang der Distributionskette vorgenommen werden und eine adäquate Umsetzung der Komponenten: *Distributionsnetzwerk* und *Carbon Footprint für Fast Moving Consumer Goods* in einem Simulationsmodell überlegt und umgesetzt werden.

3.2 Elemente und Strukturen der Distributionslogistik

Das Logistiksystem bzw. die physische Ebene als Netzwerk lässt sich über Systemelemente darstellen. Hierbei werden Standorte (Systemelemente) definiert, bei denen stationäre Logistikprozesse wie Lager-, Transport- und Umschlagsprozesse durchgeführt werden. Die Verbindungen zwischen den Systemelementen stellen Beziehungen der Standorte zueinander dar und dienen raumüberbrückenden Wertschöpfungsprozessen. Eine Analyse der Struktur des Netzwerkes und der dazugehörigen Prozesse für die Distributionslogistik ist notwendig, um eine Umsetzung in ein Modell vorzunehmen, worüber verschiedene Konfigurationen vorgenommen werden können.

Gestaltung Distributionsnetzwerkes [GMS07, S.62]

- **Strukturkonfiguration:** Entscheidungen über Anzahl, Lokalisierung von Logistikstandorten und potenzieller Transportverbindungen
- **Ressourcenkonfiguration:** Entscheidungen über vorzuhaltende Transport-, Lager-, Umschlags- und Kommissionierkapazitäten sowie Prozesstechnologien

Bei der Gestaltung eines Distributionsnetzwerkes werden die Struktur- und Ressourcenkonfiguration unterschieden. Bei der Strukturkonfiguration werden die Logistikstandorte und die Transportverbindungen zwischen den Standorten im System festgelegt. Die Distributionsstruktur definiert ein Netz von Standorten und Verbindungen, durch welches die Objekte das System durchlaufen. Die Ressourcenkonfiguration weist den Standorten Transport-, Lager- und Umschlagskapazitäten zu, die es den Objekten ermöglichen das System zu durchlaufen. [GMS07, vergl. S.61ff.]

Mit Hilfe der Simulation wird die dynamische Konfiguration eines Distributionsnetzwerkes und die dazugehörige Berechnung des Carbon Footprint ermöglicht. Bevor die Simulationsläufe stattfinden, wird das Simulationsmodell entsprechend der Zielsetzung konfiguriert. Welchen Zweck soll das Modell erfüllen und welches Ziel oder Ergebnis wird verfolgt. Es wird eine Strukturkonfiguration und Ressourcenkonfiguration durchgeführt und Attribute den einzelnen Systemelementen zugewiesen. Zur physischen Distribution gehören Prozesse wie Auftragsabwicklung, Verpackung, Lagerhaltung, Kommissionierung und die Bereitstellung und Transport von Produkten. [KKK12] Die Produkte werden ab dem Abgangslager der Produktionsstätte betrachtet. Dort lagern die Produkte in verkaufsfertigen und verpackten Zustand. Der Prozess der Verpackung der Produkte wird als vorgelagerter Prozess nicht untersucht. Transport- und Lagerprozesse innerhalb des Distributionssystems werden aufgrund ihres Einflusses auf den Carbon Footprint detailliert beschrieben und besitzen für die Modellierung den höchsten Stellenwert.

Der Güterfluss erfolgt in einem Distributionssystem oder Distributionsnetz von der Quelle bis zur Senke in einem zyklenfreien Netzwerk. Das heißt, dass die Produkte von definierten Ausgangsorten über Zwischenstufen zu gegebenen Zielorten das System durchlaufen. Zyklensfrei bedeutet, dass für ein Produkt der Start- und Zielort nicht identisch ist, sondern zwischen zwei unterschiedlichen Knoten in Richtung Kunde *downstream* vollzogen wird. Das Distributionssystem ist in der Konsumgüterlogistik ausgeprägt und das Netzwerk stark strukturiert, um den Transport der Waren zu der großen Anzahl der Kunden in einem mehrstufigen Netzwerk effizient zu erfüllen. Bestandteile des Distributionssystems sind Werke, Werkslager, Zentrallager, Auslieferungslager, Umschlags- und Transshipmentpunkte, Kunden und die Transportverbindungen zwischen den Standorten. [KKK12, S.129]

3.2.1 vertikale Distributionsstruktur

Die vertikale Distributionsstruktur gibt die Distributionsstufen, die ein Produkt von der Quelle bis zur Senke durchläuft, an. Bei der direkten bzw. zweistufigen Distribution erfolgt der Transport vom Hersteller bzw. Produzenten eines Produktes auf direktem Wege zum Endkunden. Die indirekte bzw. mehrstufige Distribution beschreibt den Güterfluss zwischen Hersteller und Endkunden, wenn weitere Absatzmittler zwischengeschaltet sind, über die der Transport und Weiterverkauf abläuft. Die vertikale Warenverteilstruktur gibt die Anzahl der unterschiedlichen Lagerstufen in einem Distributionssystem an. [Sch05, vergl. S.459] Bei den Lagerstufen werden bestandsführende und bestandslose Distributionen unterschieden.

Bei den bestandsführenden Lagerstandorten werden Produkte über einen bestimmten Zeitraum gelagert. Nach VDI 2411 ist das Lagern „jedes geplante Liegen von Arbeitsgegen-

Tab. 3.1: Distributionspunkte [Sch05, vergl. S.460]

Lagerstandorte (bestandführend)	Umschlagspunkte (bestandlos)
Werkslager	Sammelumschlagspunkt
Zentrallager	Umschlagszentrum
Regionallager	Verteilumschlagspunkt
Auslieferungslager	-

ständen im Materialfluss. Das Lagern wird auch als Lagerung bezeichnet und ist die „zielgerichtete Überbrückung von Zeitdisparitäten von Lagergütern (Objektfaktoren)“ [KKK12, S.301] Ein Lager ist ein Raum oder eine Fläche zum Aufbewahren von Stück- und/oder Schüttgut, das mengen- und/oder wertmäßig erfasst wird“ [VDI70, S.18]. Lagerprozesse lassen sich durch Mengendisparitäten zwischen Bereitstellung und Nachfrage von Produkten an unterschiedlichen Standorten nicht vermeiden. Zielsetzung ist es, Lagerprozesse möglichst zu vermeiden. Abhängig von der Distributionsstufe werden in der Reihenfolge ausgehend vom Produzenten bis zum Kunden: Werkslager, Zentrallager, Regionallager und Auslieferungslager unterschieden. Neben den bestandsführenden logistischen Knoten, gibt es die Umschlagspunkte im Distributionsnetzwerk als bestandslose Standorte. Umschlagsprozesse werden nach DIN 30781 als „Gesamtheit der Förder- und Lagervorgänge beim Übergang der Güter auf ein Transportmittel, beim Abgang der Güter von einem Transportmittel und wenn Güter das Transportmittel wechseln“ [KKK12, S.600] [DIN89] definiert. An Umschlagsstandorten kommt es oftmals zu Veränderungen der Objektstruktur nach Art und Menge, aber es liegen keine Lagerprozesse vor, sondern der Wechsel von Transportmitteln erfolgt oder eine Beladung, Entladung oder Umladung der Produkte wird ausgeführt.

Für die Planung und Konfiguration der Distributionsstruktur ergeben sich verschiedene Kriterien: [Sch05, vergl. S.459] [HHU11, S.241]

1. Anzahlproblem (Lager- und Umschlagszentren)
2. Stufenproblem (Stufung des Logistiksystems)
3. Standortproblem
4. Zuordnungsproblem (Kunden, Aufträge, Produkte, Kapazitäten zu Standorten)

Bei Betrachtung eines fertig verpackten Produktes entlang der Distributionskette, vom Ausgangslager einer Produktionsstätte bis zum Endhändler, durchläuft das Produkt eine bestimmte Anzahl von Logistikstandorten (logistischen Knoten) wie Lager und/oder Umschlagspunkten. Die Gestaltung der Distributionsstruktur wird vom Simulationsanwender vorgenommen. Zur Berechnung des Carbon Footprint ist bedeutend, welche Komponenten wie Einfluss auf den Energieverbrauch nehmen. Je nachdem welchen Weg ein Produkt über die Transportverbindungen und den Standorten durchläuft, verändert sich der artikelspezifische CO₂e-Fußabdruck.

Bei den Lagerstandorten werden verschiedene Faktoren betrachtet, die Einfluss auf den Carbon Footprint eines Produktes nehmen. Welche Energieverbräuche bei einem Lagerstandort vorhanden sind und wie eine Allokation Kohlendioxid-Äquivalente erfolgt, wird in einem späteren Kapitel beschrieben. Einfluss auf den CO₂-Fußabdruck eines Produktes

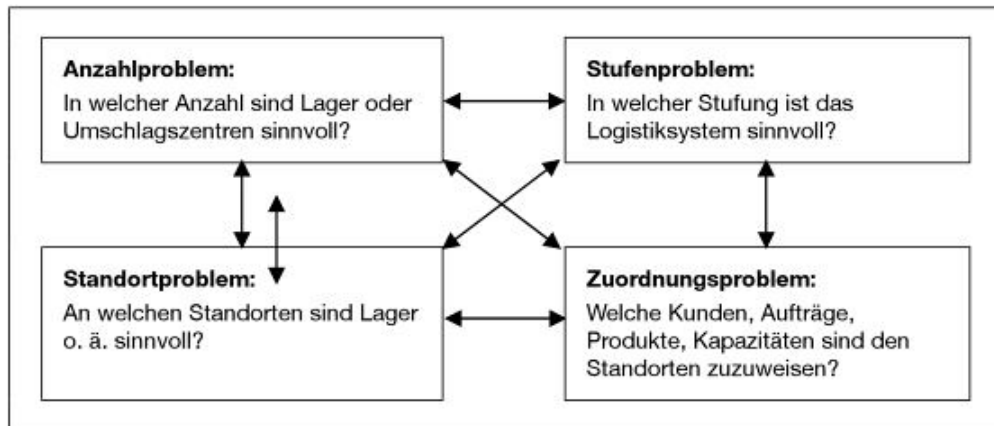


Abb. 3.1: Vertikale Distributionsstruktur [Sch05](vergl. Pawellek 1996)

beim Lagern nimmt hauptsächlich der durchschnittliche Lagerzeitraum eines Produktes an einem Standort. Die Anzahl der logistischen Knoten und die Struktur des Netzwerkes, sowie die Auswahl möglicher Transportverbindungen und nutzbarer Transportarten beeinflussen den Energieverbrauch. Je nachdem wie das Netzwerk strukturiert ist, ergeben sich eine Vielzahl an Möglichkeiten, wie das Produkt von der Quelle bis zur Senke das System durchläuft. Das Ziel ist es, zu ermitteln wie umweltfreundlich die einzelnen Transportverbindungen hinsichtlich der Emission von Treibhausgasen sind. Für Umschlags- und Verladepunkten entsteht kein Energieverbrauch durch die Zeit, sondern durch die vor Ort ausgeführten Prozesse. Durchläuft ein Produkt mehrere Umschlagspunkte im Distributionsnetzwerk, so wird jeweils der anteilige Energieverbrauch dem Produkt zugewiesen, der an diesem Standort entstanden ist.

3.2.2 horizontale Distributionsstruktur

Die einzelnen Stufen der vertikalen Distributionsstruktur lassen sich auf jeder Distributionsstufe in die *Breite* oder in horizontaler Richtung durch Standorte der gleichen Art erweitern. Die horizontale Distributionsstruktur beschreibt die Art und Anzahl von Akteuren auf jeder Distributionsstufe.

Horizontale Struktur [HHU11, S.241] [Sch05, vergl. S.464]

- Standorte (Standortbestimmung)
- Anzahl der Lager auf jeder Stufe
- Zuordnung der Lager zu Absatzgebieten

Die Anzahl der Lager auf jeder Stufe beeinflussen die möglichen Transportverbindungen und Wege zum Absatzmarkt. Die Struktur und die Standortbestimmung der Lager wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Dazu gehören der zugeordnete Abnehmerkreis und das Bestellverhalten und die Bestellmengen der Kunden in der Region. Dabei wird berücksichtigt wie die Warenauslieferung vom Produktionsstandort bis zum Kunden erfolgt und welche Vorratshaltungskapazitäten notwendig sind. Für die Berechnung des Carbon Footprint sind insbesondere die Transportentfernungen relevant, die von der Distributionsstruktur beeinflusst werden. Ein Distributionsnetzwerk mit einer großen Anzahl an Standorten auf horizontaler vergrößert die Auswahl von möglichen Transportverbindungen zum Zielort.

3.3 Prozesse der Distributionslogistik

3.3.1 Transport

Der Transport kann in den innerbetrieblichen und außerbetrieblichen Transport unterteilt werden. Der innerbetriebliche Transport beschreibt den Transport innerhalb eines Standortes. Der außerbetriebliche Transport findet zwischen verschiedenen Standorten statt. Für die Erfassung von Treibhausgasemissionen entlang der Distributionskette wird der außerbetriebliche Transport für die Berechnung des Carbon Footprint detailliert beschrieben. Der Transport zwischen Standorten erfolgt mit Transportmittel über Transportverbindungen in einem Netzwerk. Der Transport von Gütern erfolgt über verschiedene Transportarten wie Seegüterverkehr, Luftverkehr, Straßen- und Bahnverkehr. Jedes Transportmittel weist verschiedene Attribute zu Nutzlast, Ladungsvermögen, Energieverbrauch etc. auf. [Gud12a, vergl. S.848] Zwischen den Standorten erfolgt über ein Netz von Verbindungen der Transport von Gütern. Der Transportprozess definiert sich als räumliche Gütertransformation um die Nachfrage nach Produkten zu bedienen.

Transportsystem

- Transportgut: Artikel, Gewicht, Volumen, Anforderungen, Menge
- Transportmittel: Nutzlast, Ladevolumen, Transportgeschwindigkeit, Transportkapazität
- Transportnetzwerk: Verkehrsinfrastruktur, Standortinfrastruktur

Ein Ziel beim Transport ist die bestmögliche Auslastung des Transportmittels, das heißt der verfügbare Laderaum wird vollständig genutzt. Der Anteil von Leerfahrten sollte im besten Falle bei null Prozent liegen. Ganz vermeiden lassen sich Leerfahrten nicht, so dass eine Minimierung des Leerfahrtenanteils angestrebt wird. Der Energieverbrauch bei den Transportmitteln wird nach dem Treibstoffverbrauch [l/100km] beim Straßen- und Lufttransport, dem Stromverbrauch [kW/h] beim Schienenverkehr und dem Brennstoffverbrauch [kg/sm] beim Schiffsverkehr unterschieden.

Der Transport wird über verschiedene Distributionsstufen von der Quelle bis zur Senke durchgeführt.

3.3.2 Lagerung

„Ein Lagerhaus ist ein Knoten im logistischen Netzwerk, in dem Güter vorübergehend festgehalten oder auf einen anderen durch das Netzwerk führenden Weg übergeleitet werden.[Pfo10, S.112]“Das Lagern verändert die Zeiteigenschaften eines Produktes. Aufgabe des Lagers ist es „neben der Bereitstellung und Vorratshaltung eine Pufferfunktion zum Ausgleich von mengenmäßigen oder zeitlichen Schwankungen [WTT87, S.12]“auszuführen. Das Lager übernimmt die Funktion eine zeitliche Differenz zwischen Bereitstellung von Produkten und der Nachfrage durch den Kunden zu überbrücken. [KKK12, vergl. S.127] Die Lager unterscheiden sich nach Anzahl, Art und der geographischen Lage zu den Produktionsstandorten. Je nach Bedarf kann ein Netzwerk von Lagern und Umschlagspunkten im Distributionsnetzwerk in verschiedener Größe und Struktur eingesetzt werden um

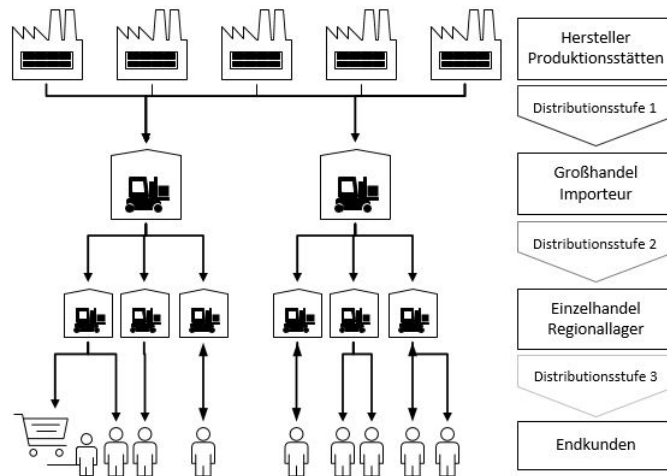


Abb. 3.2: Distributionsstufen nach [Koe12] (eigene Anpassung)

den Güterfluss zu gewährleisten. Im Lager erfolgen die statische Warenlagerung, die die Bereitstellung von Artikelkapazitäten umfasst, und die dynamische physische Auftragsabwicklung wie Kommissionierung, Sendungsbildung, Verpackung und das Handling der Produkte. Die Prozesse wie die Einlagerung, Auslagerung, Verpackung und die Kommissionierung (Bereitstellung) von Artikeln werden für die Lagerknoten nicht in dem Simulationsmodell nachgebildet. Die Umsetzung in das Modell würde dieses durch eine Vielzahl an Komponenten und Möglichkeiten unnötig kompliziert machen.

Lagersystem [Sch05, vergl. S.467]

- Lagergut: Artikel, Volumen, Anforderungen, Quantität, Lagerzeit
- Lager: Art, Struktur, Kapazität, Förder- und Lagertechnik, Bestand
- Lagerprozesse: Klimatisierung, Kühlung, Kommissionierung

Für die Lager werden mehrere Informationen benötigt. Je nachdem wie hoch die Lagerkapazität ist und der aktuelle Bestand ist, lässt sich die verfügbare Kapazität berechnen. Die Lagerstruktur gibt Informationen, welche Artikel wie wo gelagert werden können. Das Ausgangslager in der Produktionsstätte, das auch als Fertigwarenlager oder Distributionslager bezeichnet wird, gleicht Schwankungen bei der Bereitstellung von fertigen Produkten und der Nachfrage durch den Absatzmarkt aus. Der innerbetriebliche Materialfluss im Lager durch Transportsysteme wird nur teilweise im Modell berücksichtigt.

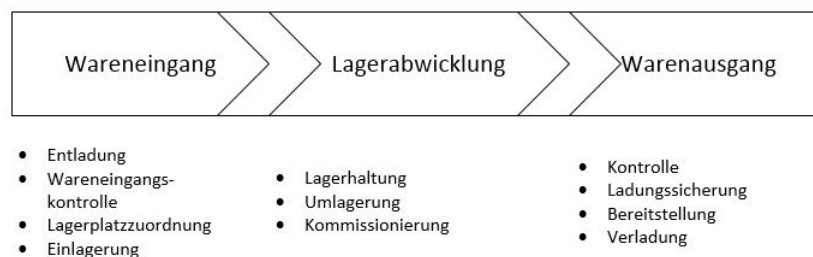


Abb. 3.3: Hauptprozesse Lagerabwicklung [KKK12, vergl. S.298]

3.4 Fast Moving Consumer Goods

Unter Fast Moving Consumer Goods (FMCG) werden schnelldrehende Artikel bzw. Schnelldreher des Handels verstanden, die eine hohe Umschlagshäufigkeit aufweisen [KKK12, S.507]. Güter mit einer hohen Warenrotation sind Konsumgüter des täglichen Bedarfs, die in großen Mengen verkauft werden und preisgünstig sind. Dazu werden zum Beispiel Nahrungsmittel, Körperpflegeprodukte sowie Wasch-, Putz-, und Reinigungsmittel und weitere zugeordnet. [Sta13] Es werden spezielle Anforderungen an bestimmte Güterklassen gestellt. Bei leicht verderblichen Gütern ist oftmals eine durchgehende Kühlung entlang der Distribution vom Hersteller bis zum Kunden im Bereich des Transportes und der Lagerung notwendig. In der Logistik wird nach gekühlten und tiefgekühlten Gütern unterschieden, die entsprechend unterschiedlich behandelt werden müssen. Tiefgekühlte Produkte benötigen einen niedrigeren Temperaturbereich gegenüber gekühlten Produkten. Die benötigte Energie in Kühllagern und bei Kühltransporten wird zum Carbon Footprint dazugerechnet und den Artikeln in den Kühlzonen zugeteilt. Fast Moving Consumer Goods weisen bestimmte Eigenschaften auf Seiten des Absatzvermittlers und auf der Seite des Kunden auf. Die Konsumgüter besitzen eine hohe Artikelvielfalt. Es sind zumeist niedrigpreisige Produkte, die in größeren Mengen und an zahlreiche unterschiedliche Standorte geliefert werden.

Faktoren für Kunden [Maj98, vergl.]

- häufiger Bedarf (Einkauf, Nachfrage)
- geringer Preis
- geringes Engagement bei Auswahl

Faktoren für Anbieter [Maj98, vergl. S.26ff]

- hohe Absatzmengen (hohe Nachfrage, hoher Verbrauch)
- geringer Bruttogewinn (Deckungsbeitrag)
- weitreichende Distributionsnetzwerke
- hohe Umschlagshäufigkeit (schnell verkauft)
- kurzes Produktleben (Haltbarkeit)

Die Untersuchung des Carbon Footprint für die konventionelle Distribution wird auf die Variante der schnelldrehenden Güter begrenzt. Dadurch kann gezielt ein Simulationsmodell entwickelt werden und die Anzahl an möglichen Varianten des Distributionssystems wird begrenzt. Des Weiteren finden bestimmte Anforderungen der Güter eine höhere Beachtung und werden in das spätere Modell mit einem höheren Detailgrad berücksichtigt und implementiert [Koe12, vergl. S.51]. Besonders berücksichtigt müssen alle speziellen Anforderungen von den Konsumgütern des täglichen Bedarfs innerhalb des Distributionssystems. Bestimmte verderbliche Güter müssen entlang der Transportkette gekühlt werden. Für alle Artikel, die die Distributionslogistik durchlaufen, müssen Attribute für die Lagerung, dem Transport und dem Umschlag festgelegt werden. Tiefkühlprodukte werden als *tiefgefroren*, *tiefgekühlt*, *Tiefkühlkost* oder *gefrostet* bezeichnet und müssen nach der Verordnung

über tiefgefrorene Lebensmittel (TLMV) bei ihrem Transport von der Produktion bis zum Endverbraucher durchgängig mindestens eine Temperatur von minus 18 Grad Celsius aufweisen. Die Kühlkette darf nicht unterbrochen werden und bei Umladevorgängen ist eine kurzzeitige Temperaturabweichung von höchstens drei Grad Celsius erlaubt. Artikel mit der Anforderung Tiefkühlung werden während des Transports und der Lagerung Tiefkühlzonen gelagert bzw. transportiert. Durch die Kühlung wird mehr Energie benötigt, sodass diese Zonen einen veränderten CO₂e-Emissionsanteil aufweisen. Die Kühltemperatur ist variabel, sodass je nach benötigter Kühlleistung der Energieverbrauch für eine Kühlzone bestimmt wird und der CO₂e-Anteil den darin gelagerten Produkt zugeteilt wird. [Bun91, vergl.]

Der Energieverbrauch ist überwiegend von der eingestellten Sollkühltemperatur abhängig. Die variablen Einflüsse wie die Lageraußentemperatur und der Lagerfüllgrad werden nicht berücksichtigt. Eine Kühlzone weist einen fixen Energieverbrauch auf. Der CO₂e-Anteil wird auf die gelagerten Artikel je nach Kriterium, Stückzahl oder Volumen zugewiesen. Neben der Notwendigkeit der Kühlung gibt es auch die Möglichkeit, dass Lagerzonen beheizt werden müssen oder eine bestimmte Luftfeuchtigkeit im Lagerraum vorliegt. Klimatisierte Lagerzonen werden daher entsprechend in das Modell als Zonen mit speziellen Attributen implementiert und die Erfassung der CO₂e-Emissionen als Bestandteil für die Zonen ins Modell integriert. Beim Transport werden gekühlte und isolierte Spezialfahrzeuge beziehungsweise Transporteinheiten wie Container verwendet. Kühlfahrzeuge können mehrere Kühlkammern mit unterschiedlichen Temperaturen haben. Für jede Zone mit einem erhöhten Energieverbrauch wird den darin gelagerten Produkten der zusätzliche CO₂e-Anteil dieser Zone zugeteilt. Neben der normalen Lagerung müssen spezielle Lagerzonen in der Simulation berücksichtigt werden. Dazu gehören temperaturgeregelter Lagerzonen, in denen die Temperatur durch Energieaufwand angepasst wird. Entweder wird eine Kühlung benötigt um eine niedrigere Temperatur zu erzielen oder die Lagerzone wird, um eine höhere Temperatur zu erreichen, beheizt. Außerdem kann durch eine Klimatisierung die Luftfeuchtigkeit des Lagerraums angepasst werden oder ein Lüftungssystem zur Erreichung einer bestimmten Luftqualität verwendet werden.

Der CO₂e-Anteil verändert sich nach Stückzahl oder dem Volumen und ist abhängig von der Lagerdauer des Produktes und dem Energieverbrauch des Lagers. Für Artikel mit der gleichen Artikelnummer wird der CO₂e-Anteil summiert, wenn die Artikel in einer gleichwertigen Zone an einem gleichen Standort sich befinden.

4 Emissionsquellen in der Distributionskette

Nachdem das Produktsystem und die dazugehörigen Systemgrenzen definiert worden sind, erfolgt die Identifikation und Bestimmung der Treibhausgasemissionsquellen für die Distributionslogistik. Bei der Identifikation der Quellen muss entschieden werden, welche Quellen einen wichtigen Einfluss auf den Carbon Footprint haben und welche Bestandteile möglicherweise aufgrund eines sehr geringen Einflusses vernachlässigt werden können (cut-off-Prinzip). Nach der Bestimmung der Quellen wird eine Datensammlung vorgenommen, um die Berechnung der Treibhausgasemissionen für das untersuchte Produktsystem durchzuführen. Wenn ein Ansatz zur Berechnung des Carbon Footprint entwickelt wurde, wird eine Umsetzung in ein Simulationsmodell vorgenommen und damit die Berechnung des Carbon Footprint ermöglicht.

4.1 Analyse der THG-Emissionen im Transport

Die Erfassung von Treibhausgasemissionen für den Transportprozess wird in der DIN 16258 [DIN13a] beschrieben. In der Norm wird die Berechnung des Energieverbrauches und von Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen beschrieben. Der Energieverbrauch beschreibt die Menge an Energie, die bei Prozessen eingesetzt wird. Bei Fahrzeugen wird der Energieverbrauch nach Kraftstoff- und Stromverbrauch unterschieden und ist die Menge eines Energieträgers, die das Transportmittel verbraucht. Die Produktion und Verteilung der Energieressource wird in die Treibhausgasbilanz mit einbezogen. Energie wird bei Transportprozessen hauptsächlich für den Fahrzeugantrieb verwendet. Daneben werden Energieverbräuche für Heizung/Kühlung, Beleuchtung und Lüftung etc. berücksichtigt. [DIN13a, vergl.]

1. **Berechnung:** Ermittlung des Energieverbrauchs und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen (CO_2e)
2. **Allokation:** Zuteilung der ermittelten Treibhausgasemissionen zu der Ladung des Fahrzeuges

Die Anwendung der Methode lässt sich in zwei wesentliche Teilschritte untergliedern. Als Erstes wird für die Transportprozesse der Energieverbrauch des Transportmittels ermittelt. Der Energieverbrauch variiert unter bestimmten Einflüssen und Attributen des Transportes. Neben dem Energieverbrauch können die Treibhausgasemissionen bestimmt werden und in die Vergleichseinheit der Kohlendioxid-Äquivalente (CO_2e) umgerechnet werden. Die Erfassung der Treibhausgasemissionen beim Transport wird auch nach DIN 16258 auf die sechs benannten Treibhausgase begrenzt. Nach Ermittlung der CO_2 -Anteile des Transportes wird eine Allokation zur der Ladungsmenge des Transportmittels vorgenommen.

6 Treibhausgase für den CF [DIN13a, S.8]

1. Kohlendioxid (CO_2)

2. Methan (CH_4)
3. Distickstoffoxid (N_2O)
4. teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC)
5. perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC)
6. Schwefelhexafluorid (SF_6)

Als zweiter Teilschritt erfolgt die Allokation der Treibhausgasemissionen. Unter Allokation wird die „Zuordnung gegebener Elemente zu den ausgewählten Objekten“ [Klo01] verstanden. Im vorliegenden Fall werden den Gütern und den Artikeln nach festgelegten Allokationsregeln ein Anteil der Treibhausgasemissionen zugeordnet. Durch die Zuteilung der Kohlendioxid-Äquivalente zu den einzelnen Artikeln wird angegeben, wie hoch die Klimaverträglichkeit eines Artikels ist. Unternehmen können für ihre Produkte oder Dienstleistungen den CO_2 -Fußabdruck angeben, eine Verbesserung der Klimaverträglichkeit der Prozesse entlang der Transportkette anstreben und vornehmen. Wenn ein korrekter Berechnungsansatz entwickelt worden ist, kann eine Basismethode für ein Produktsystem Schritt für Schritt durch weiter gefasste Systemgrenzen erweitert werden. Zum Beispiel kann eine zusätzliche Einbindung von weiteren Prozessen mit einem höheren Detailgrad erfolgen oder die Berechnung des Carbon Footprint auf weitere Phasen im Lebenszyklus eines Produktes erweitert werden.

Bei der Berechnung der Treibhausgasemissionen werden alle für die Transportleistung eingesetzten Transportmittel berücksichtigt. Der Gesamtkraftstoffverbrauch wird von jedem Energieträger ermittelt, welcher von den jeweils verwendeten Fahrzeugen eingesetzt wurde. Das bedeutet, wenn eine Transportart während des Transportprozesses verschiedene Energieressourcen verwendet, wird dies entfernungsbezogen erfasst und in den CO_2e -Anteil aufgenommen. Für jedes einzelne Fahrzeug werden alle Ladungs- und Leerfahrten in die Berechnung einbezogen. Leerfahrten sind als Streckenabschnitte definiert, in denen das Fahrzeug kein Transportgut geladen hat. Erfolgt während der Transportdienstleistung ein Transportmittelwechsel des Frachtgutes, wird für jede Teilstrecke mit einem Transportmittel der Energieverbrauch und die dazugehörigen Treibhausgasemissionen bestimmt. Als Teilstrecke wird der Abschnitt einer Transportroute verstanden, bei dem das Transportgut mit demselben Transportmittel befördert wird. Im Verlauf der Transportdienstleistung vom Start- bis zum Zielort wird den transportierten Artikeln der CO_2e -Anteil nach Beendigung der jeweiligen Teilstrecke zugewiesen.

Die Treibhausgasemissionen werden in direkte und indirekte Emissionen unterteilt. Direkte Emissionen (Scope 1) entstehen unmittelbar beim betrachteten Prozess. Es sind direkte Emissionsquellen in der definierten Einheit. Beim Transport entstehen direkte Emissionen durch die Verbrennung des Kraftstoffes. Dagegen werden indirekte Emissionen (Scope 2) allen vorgelagerten Prozessen zugeordnet, die nicht direkt zum untersuchten Produktsystem gehören. Indirekte Emissionen (energiegebunden) entstehen durch die Bereitstellung von Energie, zum Beispiel bei der Produktion von Strom, dem Kraftstoff und der Erzeugung von Wärme. Als Scope 3 wird den indirekten Emissionen eine weitere Kategorie zugeordnet. Dazu gehören Emissionen, die in anderen Lebensabschnitten entstanden sind, aber keinen direkten Einfluss auf die untersuchte Einheit haben. Für die Erstellung des

Tab. 4.1: Emissionsarten nach DIN 16528 [DIN13a, vergl.][DSL13, vergl. S.18]

Bezeichnung	Art	Emissionsquelle	Emissionen
Well-to-Tank	Energieprozesse	indirekt	Kraftstoff- bereitstellung
Tank-to-Wheel	Fahrzeugprozesse	direkt	Fahrzeugbetrieb
Well-to-Wheel	Fahrzeug- und Energieprozesse	direkt und indirekt	Primärenergie- verbrauch

Carbon Footprint liegt der Fokus auf den direkten Treibhausgasemissionen (Scope 1). Daneben werden teilweise indirekte Emissionen (Scope 2) in die Berechnung des Carbon Footprint eingebunden. [DIN13a, vergl.] In der DIN 16258 werden die Emissionen in die folgenden Kategorien unterteilt:

Die Well-to-Wheel-Treibhausgasemissionen umfassen neben den direkten Emissionen für einen Kraftstofftyp auch die indirekten Emissionen, die bei der Produktion des Kraftstoffes entstehen. Über einen THG-Emissionsfaktor wird nach DIN 16258 der Kraftstoffverbrauch in die Kohlendioxid-Äquivalente umgerechnet. Der CO₂e-Wert berechnet sich über den Emissionsfaktor und den Kraftstoff- und Energieverbrauch in den Einheiten Megajoule, Kilogramm oder Liter und weiteren Einheiten, sofern eine Datenbank die benötigten Umrechnungsfaktoren bereitstellt.

$$g \quad CO_2e/MJ$$

$$kg \quad CO_2e/kg$$

$$kg \quad CO_2e/l$$

Zu Ermittlung von Treibhausgasemissionen bei den Transportdienstleistungen werden die Fahrzeugprozesse (Betrieb) und die dazugehörigen Energieprozesse betrachtet. [DIN13a]

Kraftstoffe

Förderung oder Anbau von Primärenergie, Raffinieren, Umwandlung, Transport und Verteilung von Energie auf sämtlichen Stufen der Produktion des verwendeten Kraftstoffs

Elektrizität

Gewinnung und Transport von Primärenergie, Umwandlung, Stromerzeugung, Verluste in Stromnetzen

Zur Analyse der Treibhausgasemissionen bei Kraftstoffen wird die Gewinnung der Energie und der aktuelle Verbrauch beim Transportmittel betrachtet. Wird die Elektrizität zum Antrieb beim Bahntransport verwendet, so findet die Emission von Treibhausgasen bei der Produktion und Bereitstellung des Stroms und nicht bei der direkten Verwendung beim Transportmittel statt.

Für die eingesetzten Transportmittel werden verschiedene Daten zum Kraftstoff- und Energieverbrauch und Faktoren für die Umrechnung in die Vergleichseinheit der CO₂e benötigt. Die Angaben zum Energieverbrauch können aus verschiedenen Quellen stammen. Nach DIN-Norm 16258 [DIN13a] werden die folgenden vier Arten unterschieden:

1. **individuelle Messwerte:** spezifischer Messwert hinsichtlich eines bestimmten Berechnungsaspektes
2. **spezifische Werte des Transportleisters:** Messwert speziell für einen Fahrzeug- oder Routentyp
3. **Flottenwerte des Transportdienstleisters:** Messungen für den Fahrzeugbestand eines Fahrzeugtyps
4. **Vorgabewerte:** externer Wert, der nicht durch den Transportdienstleister ermittelt wurde (z.B. veröffentlichte Dokumentation)

Im besten Falle liegen für die Transportmittel die Verbrauchswerte bereits als Kohlendioxid-Äquivalente in der Form

$$\text{Zahlenwert } CO_2e \text{ Masseneinheit pro Entfernungseinheit}$$

vor. Für das Simulationsmodell wird daher als Eingangswert der Verbrauch eines Transportmittels in **Kohlendioxid-Äquivalent pro Entfernungseinheit** für den beladenen und für den unbeladenen Zustand benötigt. Eine Umrechnung des Verbrauches des Transportmittels in die vorgegebene Einheit muss daher vom Anwender vorab durchgeführt werden. Durch Vorgabewerte aus Datenquellen (Datenbank) mit Verbrauchsdaten und Umrechnungsfaktoren für verschiedene Transportmittel lassen sich zuverlässige Eingangsdaten verwenden, die die Unsicherheit von falschen Eingangswerten verringern.

4.1.1 Straßengüterverkehr

Der „Straßengüterverkehr (synonym Güterkraftverkehr) bezeichnet Gütertransporte, die mit Kraftfahrzeugen auf dem Verkehrsträger Straße erfolgen“ [KKK12, S.536]. Der straßengebundene Transport von Gütern besitzt im Modal Split mit Abstand den größten Marktanteil im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern im Güterverkehr. [pro07, vergl.] Bei der Betrachtung von Konsumgütern für den kurzfristigen Verbrauch (Fast Moving Consumer Gütern) ist der Lastkraftwagen das meistgenutzte Transportmittel. Der Lastkraftwagen (LKW) ist ein nutzlaststarkes, flexibles Transportmittel, welches in der Lage ist, in der Fläche über eine feinmaschige Infrastruktur jeden beliebigen Zielort mit Anbindung an das Straßennetz mit variablen Sendungsgrößen zu erreichen. Dadurch ist der Lastkraftwagen zur Durchführung von Haus-zu-Haus-Verkehren geeignet. Bei dem Transport werden die Güter auf direktem Wege vom Verladeplatz bis zum Kunden durchgeführt. [KKK12, vergl. S.541]

Die Lastkraftwagen werden in verschiedene Gewichtsklassen eingeteilt und Emissionsfaktoren für die einzelnen Fahrzeugtypen bestimmt.

Tab. 4.2: Gewichtsklasseneinteilung für Lastkraftwagen [DSL13, S.45]

Leichte LKW	Mittelschwere LKW	Schwerer LKW	Last- und Sattelzug
kleiner 7,5t	7,5t - 12t	12t - 24t	24t - 40t

Der Energieverbrauch ergibt sich beim Lastkraftwagen aus dem Kraftstoffverbrauch. Je nach Treibstoffart verändern sich die Emissionsfaktoren, die eine Umrechnung ausgehend vom Energieverbrauch in die Einheit der Kohlendioxid-Äquivalente ermöglichen. Als Kraftstoffe werden Ottokraftstoff (optional mit 5 Prozent Ethanolbeimischung), Ethanolkraftstoff, Autogas (LPG), Erdgas (CNG) oder Dieselmotorkraftstoff (optional mit 5 Prozent Biodieselbeimischung) verwendet [DIN13a, S.23]. Der Ausstoß von Treibhausgasemissionen durch Verbrennung des Kraftstoffes beim Transportvorgang und die Produktion und Bereitstellung wird im CO₂e-Wert integriert. Der Wert setzt sich wie folgt zusammen:

$$\text{Zahlenwert} \cdot \text{CO}_2\text{e} \cdot \text{Masseneinheit} \text{ pro Entfernungseinheit}$$

Die Verbrauchswerte werden in der vorliegenden Untersuchung nach Ladungsfahrt oder Leerfahrt unterschieden. Die Verbrauchswerte können vorgegeben oder der Flottenwert des Transportdienstleisters oder ein spezifischer Wert des Transportdienstleisters sein. Bei der Leerfahrt wird keine Fracht mit dem Transportmittel transportiert. Die Rückfahrt vom Zielort zum Ausgangsort wird dem Gesamtenergieverbrauch angerechnet, der sich aus dem Verbrauch (beladener Zustand) und Verbrauch (leerer Zustand) des Transportmittels zusammensetzt. Zur Bestimmung des Energieverbrauches eines Lastkraftwagen werden mehrere Faktoren berücksichtigt. Dazu gehören:

Fahrzeugtyp Lastkraftwagenklasse

Streckenprofil Längsneigungscharakteristik

Transportentfernung Distanz zwischen Start- und Zielort

Beladungszustand Ladungsfahrt oder Leerfahrt

Straßenkategorie außerorts (Autobahn, Landstraße) oder innerorts (Stadt)

Fahrgeschwindigkeit Durchschnittsgeschwindigkeit des Transportmittels

Die Allokation der Kohlendioxid-Äquivalente wird beim Transport nach Gewicht der zu transportierenden Artikel durchgeführt. Klimatisierte (Kühlung, Heizung, Lüftung) müssen im Energieverbrauch als zusätzliche Komponente hinzugefügt werden. Volumen und Gewicht der zu transportierenden Artikel, sowie die Stückzahl müssen für den Transport bekannt sein.

4.1.2 Schienengüterverkehr

Beim Schienengüterverkehr werden Güter mit einem Zug über ein verfügbares Schienennetz transportiert. Als Transportknoten werden Güter- und Umschlagsbahnhöfe genutzt. Die Transportverbindungen zwischen den einzelnen Standorten sind begrenzt, weil sich das Schienennetz grobmaschig in der Fläche erstreckt. Start- und Zielort müssen die notwendige Infrastruktur mit Gleisanschluss und Umschlagsanlagen bereitstellen. Da ein Haus-zu-Haus-Verkehr mit dem Zug in den seltensten Fällen realisierbar ist, erfolgt der Transport in den meisten Fällen im kombinierten Verkehr. Güterzüge in Europa sind bis zu 700 Meter

lang und besitzen ein maximales Bruttogewicht von bis zu 2000 Tonnen. Der Schienengüterverkehr gilt durch eine hohe Massentransportleistung pro Transporteinheit und durch die Nutzung von Strom als Energieträger als energieeffizient und umweltfreundlich. Der Schienengüterverkehr eignet sich besonders für Transporte über große Distanzen und bei einer gleichbleibenden Ladung von der Quelle bis zur Senke. Der Hinterlandverkehr mit Zügen von und zu Seehäfen besitzt neben dem kombinierten Verkehr im Schienengüterverkehr eine hohe Bedeutung. Bei mehreren kleineren Sendungen, die räumlich und zeitlich zu unterschiedlichen Standorten transportiert werden sollen, ist der Transport aufgrund hoher logistischer Anforderungen mit dem Lastkraftwagen aufgrund der hohen Flexibilität vorzuziehen. [KKK12, vergl. S.501] Beim Transport per Zug werden durch den Einsatz von Strom als Energieträger vor Ort keine direkten Emissionen freigesetzt. Zur Berechnung der Treibhausgasemissionen sind die indirekten Emissionen, sprich die Produktion und Bereitstellung des Bahnstroms, entscheidend.

Tab. 4.3: Anteil Energieträger am Bahnstrommix in Prozent [Deu12]

Steinkohle	Erneuerbare Energien	Kernenergie	Braunkohle	Erdgas	Sonstige
31,4	24	20,2	14,2	8,3	1,9

Für jedes Land liegt ein spezifischer Strommix vor. Der Strommix gibt an, aus welchen Rohstoff- und Energiequellen der Strom prozentual gewonnen wurde. Entsprechend werden bei der Herstellung des Stroms unterschiedliche Mengen an Treibhausgasen freigesetzt. Es werden daher verschiedene CO₂e-Werte ermittelt, die bei der Berechnung von Treibhausgasemissionen für den Bahnverkehr verwendet werden können. Der Energieverbrauch bzw. Stromverbrauch richtet sich beim Schienengüterverkehr primär nach dem Bruttogewicht des Gesamtzuges. Hierbei werden nach DIN 16258 vier Klassen unterschieden:

Tab. 4.4: Zuggüterklassen nach Gewicht in Tonnen [DIN13a]

Kurzzug	Mittlerer Zug	Langzug	Langzug
500	1000	1500	2000

Zur Berechnung des Energieverbrauches werden Faktoren wie die Transportstrecke, Güterzugklasse, Zugart (Elektrisch/Diesel) einbezogen. Der Antrieb des Zuges erfolgt fast ausschließlich per Strom. Bei der Verwendung von Dieseltreibstoff ist dieses in der Treibhausgasbilanz anzugeben. Weitere Einflüsse auf den Energieverbrauch sind die Steigung des Transportweges, das aktuelle Zuladungsgewicht und die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit (max. 100-120 km/h). Bei der Allokation der Treibhausgasemissionen müssen die verwendeten Waggonarten des Zuges beachtet werden. Werden Kühlwagen verwendet, muss der Energieverbrauch zur Kühlung den darin transportierten Einheiten zugewiesen werden. Das Gleiche ist bei beheizten oder klimatisierten Güterwagen durchzuführen.

4.1.3 See- und Binnenschifffahrt

Beim Transport von Fracht auf dem Wasserweg werden der Seegüterverkehr und die Binnenschifffahrt unterschieden. Als Transportmittel werden Schiffe wie beispielsweise Container- oder RoRo-Schiffe für den Stückgüterverkehr eingesetzt. Bedeutend ist der

Seetransport bei Massengütern und nicht zeitkritischen, großvolumigen Stückgütern, die über hohe Distanzen befördert werden.[HHU11, S.93] Das Transportnetz ist dadurch eingeschränkt, dass ein Transport nur auf bestimmten Wasserstraßen möglich ist und diese für den verwendeten Schiffstyp befahrbar sein müssen. Für den Umschlag und der Verladung von Gütern werden in den Häfen Umschlagsanlagen und Fahrzeuge eingesetzt, die als Teil zu der sogenannten Suprastruktur des Hafens gehören. „Häfen sind im See- und Binnenschiffsverkehr Knoten im logistischen Netz mit der Aufgabe des Umschlags und Lagerns von Gütern - vor allem im bi-/trimodalen Verkehr.“[HHU11, S.94] Die Verbindungen zwischen den Häfen werden als Wasserstraßen definiert. Die Seeschifffahrt gilt als ein zuverlässiges, energieeffizientes, aber auch vergleichsweise langsames Transportmittel. Seeschiffe besitzen eine große Ladekapazität, die es ermöglicht sperrige, voluminöse, aber auch sehr schwere Güter zu transportieren. Der Güterverkehr im Binnenseeverkehr, speziell im landesinneren Kurzverkehr, konnte sich bisher gegen den Straßenverkehr nicht durchsetzen. Zu groß ist der Vorteil des Lastkraftwagens, direkt und flexibel die Produkte vom Start bis zum Zielort ohne umständliche Umschlagsvorgänge auf andere Transportmittel, zu transportieren. Der Seegüterverkehr ist meistens Bestandteil einer Transportkette des kombinierten Verkehrs. Während der Vor- und Nachlauf eines Transportes zum Beispiel mit dem Lastkraftwagen erfolgt, wird für größere Transportdistanzen im Hauptlauf das Seeschiff zum Transport benutzt. Beim gebrochenen Verkehr werden die einzelnen Transporte in Teilprozesse untergliedert. Je nach Verkehrsmittel wird eine Berechnung des CO₂-Anteils vorgenommen. Für Umschlags- und Kommissionierprozesse in den Häfen wird der Energieverbrauch für Containerbrücken, fahrerlose Transportfahrzeuge, Portalkräne und für weitere technische Einrichtungen erfasst und als Durchschnittswert in der Berechnung zum Carbon Footprint den Artikeln zugewiesen.

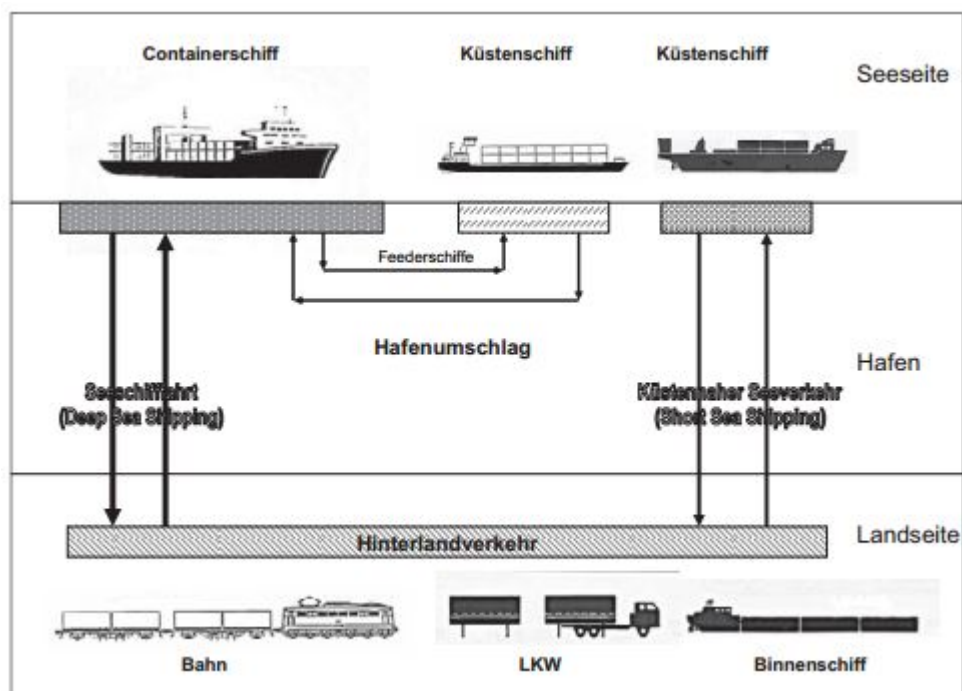


Abb. 4.1: Modal Split im Seehafenverkehr [HHU11, S.95]

Die Unterteilung in Schiffsklassen wird nach DIN 15258 für die Seeschifffahrt in Containerschiffsverkehr und Massengutschifffahrt vorgenommen. Eine weitere Untergliederung erfolgt in die Klassen nach Containerkapazität (TEU) oder nach der Tragfähigkeit (dead weight tonnage) des Schiffes. Für den Binnenschiffsverkehr erfolgt eine Klasseneinteilung für Schiffe nach Massengut (Tonnen) und Containerkapazität (TEU). Die Durchschnittsgeschwindigkeit hat bei Schiffen einen Einfluss auf den Energieverbrauch. So schneller das Schiff fährt, um so mehr Energie wird dafür benötigt. Für die einzelnen Schiffsklassen wird eine Durchschnittsgeschwindigkeit mit dem Verbrauch im beladenen und leeren Zustand vorgegeben. Die Transportentfernung zwischen Starthafen und Zielhafen wird für die Berechnung des Gesamtenergieverbrauches benötigt. Die Einflussfaktoren für den Energieverbrauch ergeben sich wie folgt:

Fahrtgeschwindigkeit Durchschnittsgeschwindigkeit

Schiffstyp Seeschiff oder Binnenschiff

Transportentfernung Wasserweg oder Schiffsroute

Schiffsklasse Kapazität und Gewicht

Kraftstofftyp

Durch die große Anzahl an verschiedenen Schiffstreibstoffen mit unterschiedlichen Qualitäten ist der Ausstoß von Treibhausgasemissionen bei der Verbrennung des Kraftstoffs entsprechend unterschiedlich. Durch den Anwender wird eine Umrechnung mittels Emissionsfaktoren in Kohlendioxid-Äquivalente pro Entfernungseinheit vorgenommen. Bei Hochseeschiffen kann es erforderlich sein, dass während des Transportes verschiedene Kraftstoffe eingesetzt werden müssen, aufgrund von Gesetzen teilweise eine Verwendung von schadstoffärmeren Kraftstoffen in Küstennähe oder bestimmten Seegebieten vorgeschrieben ist. Hierbei wird die Distanz erfasst, die das Schiff mit der jeweiligen Kraftstoffart zurückgelegt hat und zum Schluss die Bestandteile zu einem CO_{2e}-Wert für die gesamte Transportstrecke zusammengefügt.

$$\text{Zahlenwert} \cdot \text{CO}_2e \cdot \text{Masseneinheit} \text{ pro } \text{Entfernungseinheit}[\text{sm}]$$

Als Schiffstreibstoffe werden allgemein Marine Gas Oil, Marine Diesel Oil oder Schweröl verwendet:

1. Destillate
 - a) **MGO** Marine Gas Oil
 - b) **MDO** Marine Diesel Oil
2. **MFO** Marine Fuel Oil SSchweröl"
3. **LNG** Liquid Natural Gas Flüssigerdgas"

Bei Schiffen richtet sich der Energieverbrauch nach der Schiffsklasse. Für Hochseeschiffe und Binnenschiffe liegen in den Datenbanken Verbrauchswerte für die jeweilige Gewichts- und Größenklasse des Schiffes vor.

4.1.4 Luftfrachtverkehr

Als Luftfracht werden „Sendungen und Güter, die über den Luftverkehr transportiert werden[KKK12, S.410]“, bezeichnet. Als Transportmittel werden Flugzeuge verwendet, die einen schnellen Transport über weite Distanzen ermöglichen. Die kurze Transportzeit und der zuverlässige Transport eignen sich besonders für zeitsensible, hochwertige Güter oder beispielsweise auch für verderbliche und saisonabhängige Güter und Waren. Erfolgt der Transport mit reinen Frachtflugzeugen wird dies als Luftfrachtverkehr bezeichnet. Bei Mitnahme von Gütern in dem Frachtraum eines Passagierflugzeugs wird das Gut als Beifracht oder Bellyfracht bezeichnet. Der Luftverkehr erfolgt von und zu Flughäfen, die über Flugrouten miteinander verbunden sind. Der Luftfrachtverkehr wird oftmals als gebrochener Verkehr durchgeführt. Der Vorlauf und Nachlauf des Transportes wird dabei mit anderen Transportmitteln und der Hauptlauf über größere Entfernungen per Flugzeug durchgeführt. Nachteile des Luftverkehrs sind das begrenzte Frachtvolumen durch die Rumpfstruktur, wodurch die Mitnahme von voluminösen und sperrigen Gütern erschwert wird. Zudem ist das Zuladungsgewicht begrenzt und hat einen besonders hohen Einfluss auf den Treibstoffverbrauch. Des Weiteren gilt der Flugverkehr durch den hohen Energieverbrauch und durch die starke Emission von Treibhausgasen im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln als klimaschädlich. Die direkten Emissionen entstehen beim Flugzeug durch die Verbrennung des Treibstoffes Kerosin oder Flugbenzin. Der Treibstoffverbrauch richtet sich nach dem Gesamtgewicht des Flugzeuges, der Transportdistanz, der Flugeschwindigkeit und weiteren Faktoren wie zum Beispiel den Wettereinflüssen. Indirekte Emissionen entstehen durch die Produktion und Bereitstellung der Treibstoffe. Bei der Berechnung der Flugdistanz zwischen Start- und Zielflughafen wird die Großkreisdistanz plus einem Entfernungszuschlag von 95km gemäß DIN 16258 verwendet. Dies entspricht der kürzesten Distanz zwischen beiden Standorten unter Berücksichtigung der Erdkrümmung (Erdradius). Die IPCC definiert einen Aufschlag von neun Prozent für Umwege und Warteschleifen. Für die Umrechnung in Kohlendioxid-Äquivalente werden verschiedene Umrechnungsfaktoren angegeben. Nach DIN 16258 [DIN13a] erfolgt eine Unterteilung der Flugzeugtypen nach Flugzeugtyp und Flugdistanz:

Kurzstrecke kleiner als 1500 Kilometer

Mittelstrecke zwischen 1500 und 3500 Kilometern

Langstrecke größer als 3500 Kilometer

Nach Berechnung des Gesamtenergieverbrauches des Lufttransportes und die Umrechnung in Kohlendioxid-Äquivalente kann die Allokation zu den transportierten Gütern nach Volumen, Gewicht oder Stückzahl erfolgen. Für den Transport wird eine Allokation nach dem Gewicht der zu transportierenden Artikel durchgeführt.

4.1.5 Kombiniertes Verkehr

Erfolgt der Transport von Produkten mit unterschiedlichen Transportmitteln von der Quelle bis zur Senke, so wird dies als kombinierter Verkehr (auch Intermodaler-, Multimodaler Verkehr, Kombiverkehr, gebrochener Verkehr) bezeichnet. Dabei werden verschiedene

Transportsysteme (Straßen-, Schienen-, Luft- und Seeverkehr) eingesetzt und die Vorteile von einzelnen Verkehrssystemen miteinander kombiniert. Der Einsatz des Lastkraftwagens im Vor- und Nachlauf eines Transportes von Vorteil, weil das vorhandene Straßennetz variabel genutzt werden kann und verschiedene Kunden flexibel und kostengünstig erreicht werden können. Der Schienen- und Seeverkehr besitzt bei längeren Transportdistanzen im Hauptlauf seinen Vorteile. Es können größere Gütermengen kostengünstig und umweltfreundlich über längere Distanzen transportiert werden.

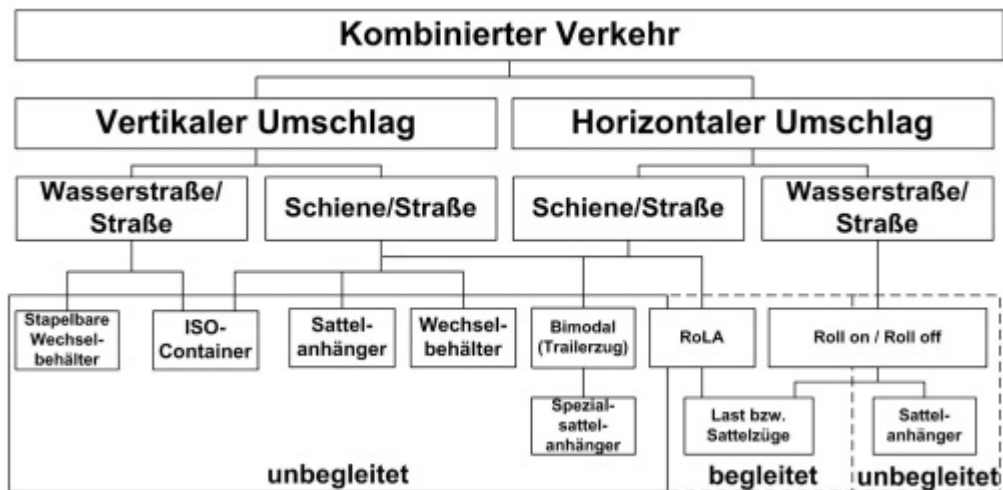


Abb. 4.2: Grundstrukturen des kombinierten Verkehr [Hof07, S.20]

Beim vertikalen Umschlag werden die Transporteinheiten wie Container, Wechselbehälter und Sattelanhänger vertikal per Kran auf das Transportmittel wie Schiffe, Lastkraftwagen oder Bahnwaggons verladen. Zum horizontalen Umschlagsverfahren gehört die *Rollende Landstraße* (RoLa). Dabei werden Lastkraftwagen mit deren Zugmaschinen (begleitet) per Zug über eine bestimmte Distanz transportiert. Die Lastkraftwagen fahren selbstständig (Roll-On/Roll-off-Verfahren) im Startbahnhof per Rampe auf das Schienenfahrzeug (Niederflurwagen) und im Zielbahnhof wieder herunter. Diese Variante wird zum Beispiel bei Gebirgsdurchfahrten angewendet, um die Straßen zu entlasten. Eine spezielle unbegleitete Variante ist der Trailerzug, bei dem die Sattelanhänger auf den Zug verladen werden. Eine weitere Variante ist der Transport von Lastkraftwagen per Schiff (Fähre), bei dem entweder der Sattelanhänger unbegleitet oder begleitet mit Zugmaschine verladen wird.

4.2 Analyse der THG-Emissionen für die Lagerung

Ein Lager als physischer fixer Standort dient im Gegensatz zu den Transportprozessen nicht der Standortveränderung von Objekten, sondern zum Ausgleich von Mengen- und Zeitdisparitäten zur Bereitstellung von Gütern. Die Artikel werden für einen bestimmten Zeitraum gelagert und bekommen innerhalb des Standortes einen Lagerplatz zugeordnet. Die Treibhausgasemissionen werden wie beim Transport ebenfalls in direkte und indirekte Emissionen unterschieden. Den indirekten Emissionen werden die bei der Produktion von Energieträgern und Kältemitteln freiwerdenden Treibhausgasemissionen zugeordnet. Als Basis wird der Energieverbrauch für die Umschlagseinrichtungen, Umschlagsförder-

fahrzeuge, Terminals und Büros über das Jahr erfasst und als Durchschnittswert (CO₂e) auf die gelagerten Güter aufgeteilt. Der Energieverbrauch von Sortier- und Förderanlagen wird nicht detailliert betrachtet, sondern ein durchschnittlicher Jahresgesamtverbrauch ermittelt und dem täglichen Basisenergieverbrauch des Lagers zugewiesen. Beim Stromverbrauch wird der Energiemix des jeweiligen Landes berücksichtigt. Durch Photovoltaikanlagen kann der Strom durch regenerative Quellen genutzt werden und eine Erdwärmepumpe kann beispielsweise als umweltfreundliche Energiequelle für das Heizungs- und Kühlsystem verwendet werden. Im Gegensatz zum Energieverbrauch beim Transport richtet sich der Energieverbrauch bei der Lagerung nicht nach der Entfernung, sondern nach dem Zeitraum, den die gelagerten Artikel am Standort befinden. Neben der Nutzung elektrischer Energie werden Energieträger wie zum Beispiel Erdgas, Heizöl, Flüssiggas und Fernwärme als Wärmequelle zur Wärmeerzeugung erfasst. Die Nutzung und Verbrauch von Elektrizität am Standort selbst besitzt keine direkten Treibhausgasemissionen. Indirekte Emissionen entstehen bei vorgelagerten Prozessen wie der Produktion und Bereitstellung des Stroms. Bei der Berechnung von Treibhausgasemissionen muss der Strommix des jeweiligen Landes berücksichtigt werden. Wird Ökostrom zum Betrieb des Standortes verwendet, wirkt sich dies positiv auf die CO₂-Bilanz aus. Der Energieverbrauch kann wie beim Transport über die Emissionsfaktoren in Kohlendioxid-Äquivalente umgerechnet werden. Wird der Lagerraum beheizt oder gekühlt, wird dafür eine bestimmte Energiemenge benötigt, welche in CO₂e pro Zeiteinheit umgerechnet und den dort gelagerten Artikeln zugewiesen wird. Die beim Kühlen verwendeten Kältemittel entweichen über die Zeit und sind starke Treibhausgase. Die Kältemittelverluste bei Tiefkühl- und Kühllagern werden daher in der Bilanz des Carbon Footprint angerechnet. Zur Ermittlung der Verflüchtigung von Kältemittel kann als Verbrauchswert der Nachfüllwert von Kältemitteln oder mittlere Leckagewerte für das eingesetzte Kühlsystem verwendet werden. Für Lagerräume mit Klimatisierung und Belüftung wird der Energieverbrauch für diese Zone separat ermittelt und den darin gelagerten Artikeln zugewiesen. Etwaige Verbrauchswerte müssen durch den Anwender oder durch Datenbanken bereitgestellt werden. Als Datenquellen für den Verbrauch von elektrischer Energie kann der für den Jahresverbrauch gemessene Wert (exakter Wert oder Durchschnittswert) genutzt werden, der als Tagesbasiswert heruntergerechnet wird und den gelagerten Artikeln zugewiesen wird. Für die Beheizung des Lagers wird der Verbrauch als Durchschnittswert für den verwendeten Energieträger ermittelt. Dabei können Verbrauchswerte der Vorjahre für einen Standort verwendet und einen Durchschnittswert daraus ermittelt werden. Der Energieverbrauch wird über die Emissionsfaktoren in die Kohlendioxid-Äquivalente umgewandelt. Für das Simulationsmodell wird erwartet, dass der Anwender den Energieverbrauch als Eingangswert in die Einheit der Kohlendioxid-Äquivalente umgerechnet hat:

$$\text{Zahlenwert} \cdot \text{CO}_2\text{e} \cdot \text{Masseneinheit} \quad \text{pro} \quad \text{Zeiteinheit}$$

Die Masseneinheit wird in Gramm g oder in einem Vielfachen wie Kilogramm oder Tonne angegeben. Die Zeiteinheit kann als Stunde, Tag, Monat oder Jahr vorliegen. Folgende Faktoren beeinflussen den CO₂e-Anteil:

Lagerdauer Zeitdauer der Lagerung für den Artikel

Allokationsparameter Volumen

Lagerzone Klimatisierung (gekühlt, beheizt, belüftet (Luftqualität und Luft))

Energieverbrauch Beleuchtung, Elektronik(IT), Umschlagsanlagen, Verpackung

Transport innerbetrieblich durch Flurförderfahrzeuge, Fördertechnik

Verpackung

Nach Berechnung des Energieverbrauches des Lagers und durch die erfolgte Umrechnung in Kohlendioxid-Äquivalente wird die Allokation der CO₂e-Anteile zu den gelagerten Anteilen durchgeführt. Dabei sind Faktoren wie Lagerzone, Lagerdauer und der Allokationsparameter entscheidend. Die Umsetzung in einem Datenmodell und die Allokationsmöglichkeiten für ein Lager werden im Kapitel 5 beschrieben.

5 Simulation

5.1 Definition

Unter Simulation wird „das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind [VDI10, S.3]“ verstanden. Ergänzend ist es „das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell [VDI10, S.3]“. Mit Hilfe des Simulationsmodells, welches in einem bestimmten Detailgrad ein System der Realität darstellt, können durch Veränderung von Parametern, Experimente durchgeführt und Ergebnisse unterschiedlicher Szenarien untersucht werden. Ein Experiment beziehungsweise ein „Simulationslauf ist die Nachbildung des Verhaltens eines Systems mit einem spezifizierten ablauffähigen Modell über einen bestimmten (Modell-)Zeitraum, auch Simulationszeit genannt, wobei gleichzeitig die Werte untersuchungsrelevanter Zustandsgrößen erfasst und gegebenenfalls statistisch ausgewertet werden. [VDI10, S.4]“ Ein Modell ist „eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild [VDI10, S.3]“.

Ein Einsatz der Simulation kann in vielfacher Hinsicht vorteilhaft oder sogar notwendig sein um ein System zu untersuchen. Zum einen wird die Simulation verwendet, wenn die Grenzen von analytischen Methoden erreicht worden sind. Das bedeutet, dass mit mathematischen Berechnungen kein exaktes Ergebnis erzielt werden kann oder der Aufwand zur Berechnung zu hoch ist. „Vorteile im Vergleich zu analytischen Methoden liegen insbesondere in der Modellierung der systemspezifischen, dynamischen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen über die Zeit und in der Berücksichtigung stochastischer(zufälliger) Aspekte bei der Abbildung des Systemverhaltens. [Wen08, S.1]“ Kann ein komplexes System und deren Systemdynamik nicht in Gleichungen dargestellt werden, dann ermöglicht die Simulation Wirkungszusammenhänge aufzudecken und Prozessabläufe je nach Anwendungsfall besser zu verstehen. Je nachdem welches Produktsystem untersucht wird, ist die Durchführung von Experimenten am realen System nicht immer möglich oder zu kostenintensiv. Beispiele sind dafür, wenn Experimente im Grenzbereich durchgeführt werden oder Systemvarianten untersucht werden sollen, die in der Realität noch nicht existieren. Dadurch wird das Verhalten von unbekanntem Systemen nachgestellt und Erfahrungen zum Verhalten des Systems gesammelt. Es besteht vorab die Möglichkeit eine Überprüfung durchzuführen, ob die Systemvariante und angestrebte Leistungswerte erreicht werden können. Mögliche Schwachstellen können so vorab ausgebessert werden und das System den Anforderungen gerecht konzipiert werden. Zusätzlich können zeitkritische Vorgänge mit Hilfe der Simulation untersucht werden. Prozesse können beschleunigt oder verlangsamt durchlaufen werden. In der Realität kann eine Messung von benötigten Werten und Daten schwierig oder gar unmöglich sein. Ein Simulationsmodell zeichnet die Messwerte im zeitlichen Verlauf auf,

sodass für die untersuchten Zeitpunkte Ergebnisse vorliegen. Neben dem Sammeln von Erfahrungen von noch nicht realisierten Systemen, kann die Funktionalität überprüft werden und das System bestimmter Kenngrößen optimiert bzw. eine korrekte Dimensionierung erzielt werden. [Kuh98, vergl.S.7] Der Aufwand zur Erstellung eines Simulationsmodells für ein spezifisches Produktsystem lässt sich durch Nutzung eines Referenzmodells verringern. Um mit Hilfe eines Simulationsmodells den Carbon Footprint einer Distributionskette zu ermitteln, werden vorgefertigte Simulationselemente, eine standardisierte Vorgehensweise und verfügbare Methoden und Werkzeuge verwendet. Dadurch soll eine Verkürzung der benötigten Zeit zur Durchführung einer Simulationsuntersuchung erreicht werden. Die Schwierigkeit besteht darin, ein qualitativ entsprechendes Referenzmodell zu entwickeln, was das reale System hinreichend gut abbildet und sich für die Vielzahl an verschiedenen Varianten nutzen lässt.[Kuh98, vergl. S.9]

Als simulationswürdig werden Probleme angesehen, die ausschließlich mit der Methode Simulation gelöst werden können. Des Weiteren wird die Simulation genutzt, wenn dynamische Prozesse oder auch stochastische Einflüsse beim zu untersuchenden System auftreten. Wenn mathematisch eine Problemstellung gelöst werden kann, dieses aber zu komplex und aufwändig ist. Durch Rechneranimation kann ein System anschaulich dargestellt werden und ist für die Kommunikation und Visualisierung eines Systems oder Problems ein geeignetes Mittel. Zeitgleich wird die Funktionalität des Systems dem Nutzer dargestellt. [Sch10, vergl. S.1] [Wen08, vergl.S.17]“

Auch wenn die Simulation bei der ersten Betrachtung einer Problemstellung als geeignete Methode angenommen wird, müssen mögliche Alternativen als Lösungsmethode ausgeschlossen werden und die Auswahl für eine Methode begründet werden. Simulation ermöglicht es, Prozessergebnisse auf Basis von bestimmten Startwerten zu prognostizieren und für verschiedene Szenarien eines Produktsystems eine ”Was-wäre-wenn-Analyse“ durchzuführen. Das Verhalten des Systems kann für verschiedene Konfigurationen getestet und mit einer Optimierungsmethode für eine angestrebte Zielgröße, die bestmögliche Variante gefunden werden. Für die Distributionslogistik ergibt sich daraus als Beispiel die Möglichkeit, eine Transportroute zu finden, die besonders umweltfreundlich, kostengünstig oder am schnellsten unter speziellen Rahmenbedingungen und Einstellungen ist. [Rab12, vergl. S.296ff.] [Kai13]

Die Simulation wird in verschiedene Arten unterteilt. Wird die Zeit als Unterscheidungsmerkmal für die Simulation herangezogen, ist die Klassifizierung nach statischer und dynamischer Simulation möglich. Bei der statischen Simulation wird ein System nur zu einem bestimmten Zeitpunkt untersucht. Dabei wird nur eine Momentaufnahme untersucht und der zeitliche Verlauf nicht berücksichtigt. Eine höhere Relevanz weist die dynamische Simulation auf, die das Systemverhalten von dynamischen Prozessen und Abläufen modelliert. Eine weitere Unterteilung der dynamischen Simulation erfolgt in die beiden Klassen der diskreten und kontinuierlichen Modelle. Während bei kontinuierlichen Modellen zu jedem Zeitpunkt fortlaufend die Werte ermittelt werden, verändert sich der Wert von den Größen bei diskreten Modellen nur zu bestimmten Zeitpunkten. Diskrete Modelle lassen sich weiter in ereignisdiskret und zeitdiskret unterteilen. Als Eingangsgrößen für das Modell können

deterministische bzw. fest definierte Werte oder stochastische bzw. vom Zufall beeinflusste Werte genutzt werden.

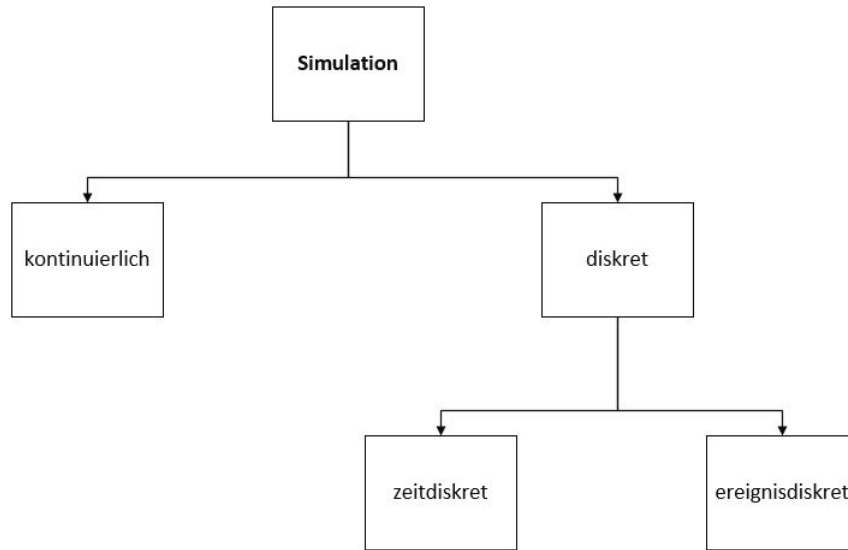


Abb. 5.1: Simulationsarten [VDI10, vergl.]

In den meisten Fällen, speziell im Bereich der Logistik mit seinen dynamischen Abläufen, wird die Ereignisdiskrete Simulation (Discrete Event Simulation DES) als Simulationsmodell genutzt, die nachfolgend näher erläutert wird. Die Ereignisdiskrete Simulation bildet das „dynamische Verhalten des Systems unter Verwendung stochastischer Komponenten mit Zustandsänderungen an diskreten Zeitpunkten[Mae11, S.14]“ ab. Das bedeutet, dass sich Modellzustände zu bestimmten differenzierbaren Zeitpunkten ändern und Werte nur zu diesen Zeitpunkten erfasst werden müssen. Die Veränderungen des Modellzustandes werden als Events oder Ereignisse bezeichnet. Durch Ereignisse werden Aktivitäten gestartet und beendet. Ein Prozess setzt sich aus mehreren Aktivitäten zusammen. [Ele12, vergl. S.8]

5.2 Ereignisdiskrete Simulation

Die Ereignisdiskrete Simulation beziehungsweise im Englischen als ”Discrete Event Simulation”(DES) bezeichnet, eignet sich als effiziente Simulationsmethode für zeitvariable Systeme und wird nach Rabe 2012 wie folgt beschrieben: „For analyzing time-variant-systems where changes occur not every single step but only at discrete points in time [Rab12, S.298]“ Das bedeutet, dass Veränderungen im System nur zu bestimmten diskreten Zeitpunkten erfolgen und erfasst werden. Die Simulation endet, wenn alle Ereignisse abgearbeitet sind oder die vordefinierte maximale Simulationszeit erreicht ist. Mit der Simulation kann theoretisch eine unendlich große Anzahl an Kriterien berücksichtigt werden. In der Praxis ist nur eine begrenzte Ressourcen- und Rechenkapazität vorhanden, sodass das Simulationsmodell so realitätsgetreu nachgebildet wird ohne dass das Modell zu komplex oder unnötig detailliert wird, weil dadurch die Rechenzeit unangemessen ansteigen würde. Je komplexer das Modell ist, umso höher ist der Planungsaufwand. Elemente des realen Systems werden je nach Bedeutung mit einem hohen oder geringeren Detailgrad im Modell

abgebildet. Für den Carbon Footprint bedeutet dies, dass wesentliche Emissionsfaktoren und Prozesse detailliert ins Modell implementiert werden. Für Elemente mit geringerem Einfluss auf das Simulationsergebnis können Vereinfachungen und Durchschnittswerte in Betracht gezogen werden. Diese Elemente werden mit einem geringen Detaillierungsgrad abgebildet, sodass Rechenleistungen eingespart werden können und der Planungsaufwand verringert wird. Die Simulation ermöglicht es die Supply-Chain-Logistik mit ihren dynamischen Prozessen realitätsnah nachzubilden. [Rab12, vergl.] (Hellström/Johnsson) Die DES-Simulation lässt sich mit Optimierungsmethoden verbinden und es kann eine Optimierung nach mehreren Kriterien durchgeführt werden. Zu einem späteren Zeitpunkt besteht die Möglichkeit, mit dem Simulationsmodell ein Distributionsroute zu finden, die einen geringen Carbon Footprint aufweist. Durch die Anpassung verschiedener Parameter und Eingangsdaten beim Simulationsmodell können verschiedene Szenarien eines Produktsystems durchlaufen werden und CO₂-Emissionen für unterschiedliche Produkte ermittelt werden.

Tab. 5.1: Vergleich von Simulation mit mathematisch-analytischen Methoden

Simulation	Analytisch-mathematisch
komplexe Problemstellungen	begrenzte Probleme
dynamisches System	statisches System
berechenbares Ergebnis (individueller Startpunkt)	vordefiniertes Ergebnis
stochastisch	linear

Die Methode des Life Cycle Assessment und der als Teilkomponente dazugehörige Carbon Footprint können in ihrer Form nicht für die Untersuchung von Treibhausgasemissionen entlang der Distributionslogistik verwendet werden beziehungsweise es werden bei Anwendung der Methoden nur unzureichende Ergebnisse erhalten. Das komplexe System der Distributionslogistik besteht aus dynamischen Prozessen, sodass eine alternative Methode zu den statischen Methoden des LCA und CFP gefunden und angewendet werden muss. Inwiefern und ob sich die Simulation sich als Methode zur Erstellung eines Carbon Footprint für die Distributionslogistik anbietet wird im Folgenden näher erläutert.

Tab. 5.2: Vergleich von statischen mit dynamischen Methoden vergl.[Rab12, Kai13]

LCA/CFP (statisch)	Simulation (dynamisch)
Zeitpunkt (Momentaufnahme)	Zeitraum (Zeitverlauf)
Untersuchung einfacher Systeme	Untersuchung komplexer Produktsysteme, Prozesse
Werte fest vergeben	Werte verändern sich während Laufzeit
fixes Szenario	verschiedene Varianten
Daten vorgegeben (vordefinierte Werte)	Berechnung während Simulationsdurchlaufs
stationärer Zustand	stochastisch und dynamisch
fest definiertes System	flexibles, veränderliches System

Wenn mit Hilfe der Simulation eine Problemstellung aus der Realität untersucht werden soll, wird das reale System, zum Beispiel ein Produktsystem in einem Simulationsmodell nachgebildet und umgesetzt. Dieser Prozess wird als Modellbildung bezeichnet und

definiert sich als „Erstellung eines für die Lösung der Problemstellung geeigneten Modells des Systems und andererseits in einer statistischen Versuchsplanung, die effizient die benötigten Resultate in angemessener Qualität liefert“[Mae11, S.16] Die Zielstellung der Arbeit ist es mit Hilfe eines Simulationsmodells den Carbon Footprint beziehungsweise die Treibhausgasemissionen für unterschiedlichen Szenarien eines Systems in der Distributionslogistik zu modellieren. Im Rahmen einer Simulationsstudie wird das reale Systeme in ein Simulationsmodell umgesetzt. Je nach Zielfestlegung und Problemdefinition werden Experimente durchgeführt, die zu Ergebnissen und Schlussfolgerungen führen, die auf die Realität umsetzbar sind. Die Aufgabendefinition beschreibt das zu lösende Problem, das mit den vorgesehenen Mitteln und im vorgesehenen Zeit- und Kostenrahmen umsetzbar ist.[Rab08, vergl. S.47] In der Systemanalyse werden die Zielsetzungen, Eingaben, Ausgaben, Elementen und Beziehungen, Annahmen und Vereinfachungen des zu entwickelnden Simulationsmodells dokumentiert und beschrieben. Das daraus entstehende Konzeptmodell beschreibt, welche Aufgabe gelöst werden soll und wie diese Aufgabe zu lösen ist. Es beschreibt den Umfang und die notwendige Detaillierung des Modells. [Rab08]

Projektphasen einer Simulationsstudie [Kuh98, S.103]

1. Zielsetzung
2. Modellbildung
3. Simulation
4. Validierung

Im Rahmen dieser Arbeit wird sich die Modellbildung des Carbon Footprint für die Distributionslogistik durchgeführt. Die spätere Umsetzung des Simulationsansatzes in ein Simulationsmodell, die Durchführung von Simulationsexperimenten für verschiedene Szenarien, die Analyse der Simulationsergebnisse und die Validierung der Simulationsergebnisse mit Messwerten aus der Realität sind nicht Bestandteil der Untersuchung.

5.3 Prozess der Modellbildung

Zur Erstellung eines Simulationsmodells gibt es verschiedene Anforderungen. Wie genau das System in einem Modell abgebildet werden soll, muss spezifisch für jede Simulationsstudie bestimmt werden. Eine Nachbildung bis in kleinste Detail würde zur Folge haben, dass der Kosten- und Zeitaufwand und die benötigte Rechenleistung zur Simulation ansteigen und das Ergebnis sich nicht unbedingt in einem sinnvollen Verhältnis zum Aufwand verbessert. Es werden daher bei Erstellung des Simulationsmodells vernachlässigbare Systemelemente ausgeklammert oder nur elementar implementiert. Bei dem Prozess der Abstraktion werden Bestandteile des realen Systems erfasst und in Modellkomponenten umgewandelt, die die Realität zu einem gewissen Grad vereinfacht darstellen. Alle Vereinfachungen, Einschränkungen oder das Weglassen von Elementen des realen Systems im Simulationsmodell müssen begründet werden und nachvollziehbar sein. Die Zieldefinition und Randbedingungen sind durch das erstellte Modell zu erfüllen, um ein richtiges

Ergebnis zu erhalten. Ziel der Modellierung ist es, das reale System in einem Simulationsmodell adäquat nachzubilden. Das System besteht aus Elementen, die in Wechselbeziehung zueinander stehen. Die Problemstellung ist dabei das reale System korrekt abstrakt darzustellen und auf die wesentlichen Elemente zu reduzieren und deren Wechselbeziehungen untereinander zu verstehen. [Ele12, vergl.S.4] Für die Modellerstellung ist es notwendig ein Verständnis der Problemstellung zu haben. Es muss bekannt sein, welches Ziel und welchen Zweck das Modell verfolgt. Für die Umsetzung werden Bestandteile des realen Systems gedanklich abstrahiert und relevante Systemeigenschaften ausgewählt. Bei der Analyse des Originalsystems wird das System in kleinere Elemente unterteilt. Für die Komponenten werden die Merkmale und Eigenschaften untersucht. In der Phase der Abstraktion (Entnahme des Allgemeinen aus dem Besonderen) werden Verallgemeinerungen durchgeführt. [VDI10, vergl. S.12] Die Phase der Modellbildung einer Simulationsphase wird in Prozessschritte untergliedert.

Prozess der Modellbildung (Modellformalisierung) [Kuh98, vergl. S.103] [Rab08, S.30]

1. Anforderungs- und Zielanalyse
2. Bestimmung der Systemgrenzen
3. Datenbeschaffung (Datenmodell)

Die Phase der **Anforderungs- und Zielanalyse** ist bereits durch die Erstellung der Aufgabenbeschreibung erfolgt. Eine Bestimmung der **Systemgrenzen** durch die Festlegung des Produktsystems auf die Distributionslogistik und den Transport von fertig verpackten Fast Moving Consumer Goods vom Ausgangslager eines Produktionsstandortes bis zum Endhändler wurde ebenfalls vorgenommen. Je nachdem wie die Systemgrenzen gesetzt werden, verändert sich der Aufwand zur Erstellung des Modells und der Datenbedarf. Die Festlegung der Systemgrenzen orientiert sich an der Zielbeschreibung, die Vorgaben zur Funktionsweise des zu simulierenden Systems und Systemvarianten angibt. vergl. [Wen08, S.117] Die Systemgrenzen für die Berechnung des Energieverbrauches und die Begrenzung und Unterteilung der Treibhausgasemissionen wurde bereits beschrieben. Die Erstellung eines Datenmodells und die Bestimmung von Parametern werden im nächsten Kapitel vorgestellt.

Während der Modellierungsphase werden verschiedene Modelle zur Beschreibung des zu untersuchenden Systems verwendet:

1. **Reales Modell:** das zu untersuchende System
2. **Konzeptmodell:** Beschreibung der abzubildenden Realität (Annahmen, Vereinfachungen, Input, Output, Ziele, Inhalte) [Rob04, vergl. S.65]
3. **Formales Modell:** Formale Beschreibung und Analyse von Systemverhalten, Wechselwirkungen
4. **Ausführbares Modell**
5. **Simulationsmodell**

Bei der prozessorientierten Modellierung werden die Prozesse des realen Systems in Aktivitäten unterteilt. Steigt der Detaillierungsgrad des Modells, besitzt dieses eine steigende Anzahl an Komponenten bzw. Modulen und der Aufwand für die Datenbeschaffung und Parametrisierung steigt an. Es sollte daher die Problemstellung adäquat in einem Modell abgebildet werden.

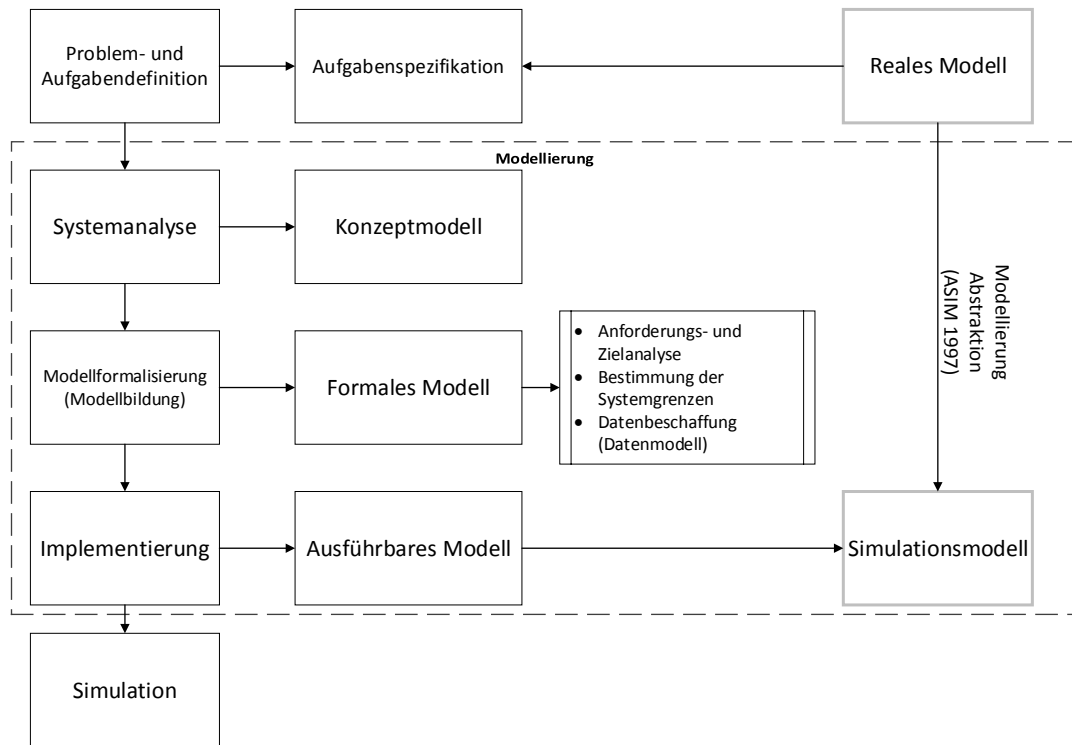


Abb. 5.2: Umsetzung eines realen Systems in einem Simulationsmodell

Ein Grundsatz dazu ist: *So detailliert wie nötig, so wenig komplex wie möglich!* [Sch10, vergl. S.2] [Mae11, S.17] Komplexe Teilmodelle können durch stochastische Komponenten möglicherweise ersetzt und vereinfacht werden. Die Komponente wird dann nicht explizit modelliert, sondern stochastisch angenähert. Es kann sinnvoll sein, anstatt exakte Werte nur Durchschnittswerte zu verwenden. Berücksichtigt werden muss auch, welche Qualität die Daten aus den vorhandenen Quellen besitzen. Stehen keine Daten zur Verfügung, kann es notwendig sein, Annahmen zu bestimmten Prozessen zu treffen, die Ungenauigkeiten oder eine Verfälschung des Ergebnisses bei der Simulation zur Folge haben können. Annahmen sind daher besonders ausführlich zu beschreiben und zu begründen. Die Zielsetzung bei der Benutzung verschiedener Datenquellen ist es, dass die Werte zu einem korrekten Ergebnis führen. Um eine hinreichende Modellqualität zu erreichen, ist die Parametrisierung von hoher Bedeutung. Dabei werden für die erstellten Modellkomponenten Parameter festgelegt, die feste Werte oder zufallsabhängige Werte (statistisch) sein können. Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss von Parameteränderungen auf das Simulationsergebnis untersucht [Mae11, S.17]. Ein Ziel der Modellierung ist es, das reale System in einem Simulationsmodell nachzubilden und eine Selektion von wichtigen Komponenten vorzunehmen, die entscheidend zum Ergebnis der Simulation beitragen. Im Rahmen der Systemanalyse wird untersucht, welche Elemente des realen Systems in

welcher Genauigkeit und mit welchen Mechanismen zu modellieren sind.[Rab08, vergl. S.46ff.] Bestimmt werden der notwendige Detaillierungsgrad der Modellkomponenten und mit welchem Modellierungsansatz das Modell erstellt wird. [Wen08] Für den Prozess der Modellierung werden nach Becker (2012) fünf Ziele angegeben. Ein zusätzliches sechstes Ziel ist die Wirtschaftlichkeit bei der Modellierung. Ist es dabei darauf zu achten, dass die Modellierung möglichst zeit- und kostengünstig durchgeführt wird. Es ist auf eine effiziente, korrekte und nachvollziehbare Modellierung zu achten.

Ziele der Modellierung [Wen08, S.126][BPV12, S.32ff.]

1. **Richtigkeit:** Struktur und Verhalten des realen Systems korrekt abbilden
2. **Relevanz:** Nur Bestandteile des Systems werden modelliert, die zur Erfüllung der Zielsetzung relevant sind
3. **Klarheit:** Modell ist verständlich in Strukturiertheit und Übersichtlichkeit
4. **Vergleichbarkeit:** mit unterschiedlichen Methoden Modelle vergleichbar
5. **Systematischer Aufbau:** Modellerstellung nachvollziehbar

Die Modellierung eines Systems kann nach drei Verfahren erfolgen. Dazu sind das Top-Down-Verfahren, Bottom-Up-Verfahren und das Middle-Out-Verfahren. Für die Modellierung der Distributionslogistik wurde das Top-Down-Verfahren benutzt, bei dem am Anfang ein abstraktes Modell des realen Systems erstellt wird und die einzelnen Komponenten im Verlauf der Entwicklung im Detailgrad und an Komplexität zunehmen. Dieses Verfahren ist vorteilhaft, wenn bekannt ist, welche Komponenten von Bedeutung sind und wie hoch der erzielte Detaillierungsgrad sein soll. Bei der Anwendung dieses Verfahrens besteht die Gefahr, dass Komponenten nicht berücksichtigt werden oder der Fokus unnötig auf der Weiterentwicklung von nicht so relevanten Komponenten liegt. Im Verlauf der Modellierung werden die Komponenten des Systems und ihre Wechselwirkungen, Abhängigkeiten und Hierarchie zueinander ersichtlich. Die Modellbildung wird von einem einfachen Modell immer weiter verfeinert und nimmt im Detailgrad und Komplexität zu. Einen besonderen Fokus wird auf Komponenten gelegt, die einen entscheidenden Einfluss auf den Modellzweck und die späteren Ergebnisse haben. [Wen08, vergl. S.126ff.]

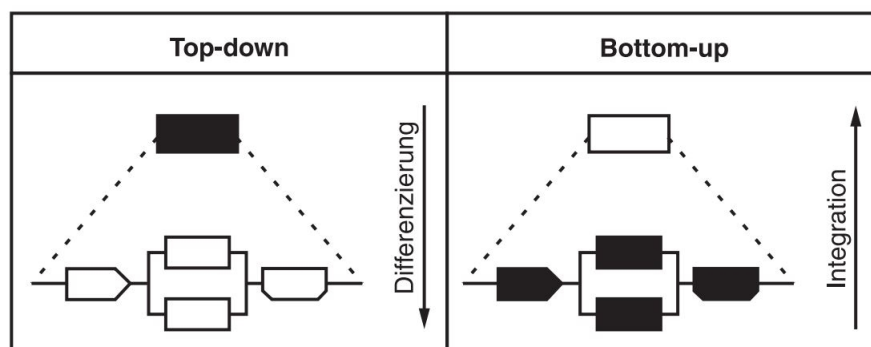


Abb. 5.3: Wege der Systemanalyse [VDI10, S.26]

Die Zielsetzung des Modellierungsprozess ist es, die in der Zielbeschreibung und Aufgabenspezifikation beschriebenen Bestandteile und Funktionen zu erfüllen. Nach abgeschlossener Modellierung erfolgt die Erhebung und Generierung der erforderlichen Daten. Diese werden in das Modell implementiert und eine Verifikation und Validierung des Modells wird vorgenommen. Nachdem die Simulationsläufe beendet sind, werden die Simulationsergebnisse ausgewertet und interpretiert. Nach Fertigstellung des Modells wird anhand verschiedener Methoden (Validierung) überprüft, ob das Modell mit der Realität hinreichend genau übereinstimmt und mit dem angestrebten Anwendungszweck und der Zielsetzung der Simulationsstudie entspricht. Gegebenenfalls sind Anpassungen bei den Systemparametern oder Veränderungen bei den Verallgemeinerungen notwendig. Danach erfolgt eine Umsetzung der Erkenntnisse in die Realität. [Rab08, vergl. S.81]

5.4 Simulationsansätze zur Erfassung des Carbon Footprint

Die Durchführung des Life Cycle Assessment bzw. des Carbon Footprint mit der Hilfe der Simulation wurden in mehreren Papers beschrieben. In vorhandenen wissenschaftlichen Papieren lag der Fokus bisher in der Umsetzung des LCA-Ansatzes beziehungsweise dem SLCA-Ansatz, der einem verkleinerten Life-Cycle-Assessment entspricht.

1. Widok

In dem wissenschaftlichen Papier „Achieving Sustainability through a combination of LCA and DES integrated in a Simulation software for production Processes“ wird analysiert, inwiefern es möglich ist, den statistischen LCA-Ansatz mit der DES-Simulation miteinander zu verbinden und in ein Simulationstool zu implementieren. Die Erfassung des Carbon Footprint wird durch Experimente, also der Wiederholung der Simulation mit verschiedenen Eingangsgrößen und Parametern, durchgeführt. Dadurch können verschiedene Szenarien eines Systems untersucht, Teilergebnisse zu bestimmten Zeitpunkten erfasst und Ergebniswerte miteinander verglichen werden. „Simulation ist das Durchführen von Berechnungen an einem Modell, bei denen Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen transformiert werden“ [Sau99, S.113] Für den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Fall der Simulation eines Carbon Footprint für die Distributionslogistik bedeutet das, dass ganz unterschiedliche Distributionssysteme im Simulationsmodell nachgebildet werden können. Durch Setzung von Parametern und Attributen wird das zu untersuchende System bestimmt. Die Ausgangsgrößen sind die berechneten CO₂e-Werte für jede Artikelart. Eingangsgrößen sind die Energieverbräuche für die einzelnen Komponenten im Produktsystem, die bereits als Kohlendioxid-Äquivalent vorliegen und beim Simulationsdurchlauf quantifiziert werden. Life Cycle Assessment beschreibt den IST-Zustand eines Systems. Es wird für einen festen Zeitpunkt das System untersucht. Mit DES kann ein höherer Detailgrad der Untersuchung erreicht werden und verschiedene *What-If*-Szenarien untersucht werden, sowie der zeitliche Verlauf von Prozessen untersucht werden. Dabei kann eine große Menge an Daten in die Berechnung einbezogen und verarbeitet werden. Es ermöglicht die Anwendung von mehreren Methoden zur Analyse von Prozessen hinsichtlich verschiedener Aspekte zusammen in ein Modell und Berücksichtigung der Abhängigkeiten untereinander wie beispielsweise

Umweltauswirkungen und ökonomische Auswirkungen. Durch die Simulation werden die möglichen Auswirkungen verschiedener Einstellungen für ein zu untersuchendes Produktsystem unter verschiedenen Bedingungen sichtbar und analysierbar. Die Ereignisdiskrete Simulation ermöglicht eine Untersuchung von komplexen realen Systemen zu unterschiedlichen Zeitpunkten und die Berechnung von unbekanntem Werten. Für den Verlauf von Prozessen in einem Produktsystem werden für den untersuchten Fall Energieverbrauch und die damit verbundenen Emissionen berechnet. Mit einem Simulationstool werden die benötigten Bausteine zur Berechnung bereitgestellt. Die Komponenten des Modells (Entities) können bestimmte Prozess- und Lebensphasen eines Produktes darstellen und erfüllen einen bestimmten Zweck oder Aufgabe. Durch Setzung spezifischer Parameter lassen sich die Komponenten anpassen und zielspezifisch eine Simulation durchführen. Es werden Attribute und Eigenschaften für ein Simulationsmodell gesetzt und damit ein spezifisches Szenario untersucht. Über eine graphische Oberfläche (graphical user interface GUI) als Bestandteil einer Simulationssoftware kann der Anwender das Simulationstool schnell und effektiv anpassen und gestalten. Die Daten werden während dem Simulationsablauf berechnet und Veränderungen sind zu jedem Zeitpunkt erfassbar.[Wid12, vergl.]

2. Andersson

In dem wissenschaftlichen Papier „Evaluation of Methods used for Life-Cycle Assessments in discrete event simulation“ wird beschrieben, wie Discrete Event Simulation (Ereignisorientierte Simulation) und das Life Cycle Assessment zur Erfassung von Umweltwirkungen miteinander kombiniert werden können. Dabei werden die Erkenntnisse von sechs Fallstudien zu diesem Sachverhalt vorgestellt und beschrieben. Discrete Event Simulation bietet die Möglichkeit einen Life Cycle Assessment und die Untersuchung von Umweltwirkungen detaillierter durchzuführen und flexibel bekannte und unbekannte Szenarien mit dem Modell zu betrachten. Die Ergebnisse verschiedener Szenarien und Produkten können miteinander verglichen werden. Im Rahmen von Simulationsstudien ist die Phase des Datenmanagements und die Sammlung von Eingangsdaten sehr zeitaufwendig. Empfohlen wird die Durchführung einer Vorabstudie, in der generell benötigte Daten bereits erfasst und strukturiert werden und damit die spätere Modellierung des Modells zu erleichtern und zu beschleunigen. Um mit der Simulation die Vorteile gegenüber einem statischen LCA ausnutzen zu können, ist die Zielsetzung die Entwicklung einer standardisierten Methode um den Life Cycle Assessment mit Hilfe der Simulation durchzuführen. Es wird die Bereitstellung, Wiederverwendbarkeit eines Simulationstools angestrebt, was es ermöglicht verschiedene Produktsysteme zu untersuchen, die sich in ihrer Funktionsweise und der Art der Prozesse ähneln. Bei einer Simulationsstudie besitzen die Phasen Systembeschreibung, Modellierung, Datenerfassung, Analyse und Kommunikation der Ergebnisse eine hohe Bedeutung. Um ein Life Cycle Assessment mit Hilfe der Simulation korrekt durchzuführen, wird eine konkrete Problemdefinition, ein strukturiertes Datenmanagement und die Verwendung standardisierter Verifikationsmethoden empfohlen. Eine Validation der Ergebnisse des Modells kann, sofern vorhanden, mit Realwerten durchgeführt werden. In dem wissenschaftlichen Papier von Andersson wird empfohlen, eine Umrechnung des Energieverbrauches in die Kohlendioxid-Äquivalente so spät wie möglich innerhalb der Si-

mulation vorzunehmen. Des Weiteren wird der Einfluss der Allokationsparameter auf das Ergebnis hervorgehoben. [And12, vergl.]

3. Lindskog

In dem wissenschaftlichen Papier „A method for determining the environmental footprint of industrial products using simulation“ von Lindskog wird beschrieben, dass statische Methoden zur Ermittlung des Umwelteinflusses von dynamischen, realen Systemen ungeeignet sind. Mit Hilfe der Discrete Event Simulation (DES) soll eine Ökobilanz von Produktsystemen und deren Produkte erfolgen. Die Methode unterteilt die Teilschritte: Datenmanagement, Bestimmung der Ökobilanz und Kommunikation der Ergebnisse. Bei der Ausführung eines Life Cycle Assessments werden zur Berechnung oftmals statische Daten verwendet, die aber nur unzureichend die dynamischen Faktoren eines Herstellungsprozesses berücksichtigen. In Folge dessen sind Vereinfachungen bei der Berechnung notwendig und die Ergebnisse erreichen möglicherweise nicht den erforderlichen Genauigkeitsgrad. Die Methode der Discrete Event Simulation (Ereignisorientierte Simulation) verwendet ein digitales Modell des zu untersuchenden Systems, welches eine Vorausberechnung des Systemverhalten für unterschiedliche Eingangsdaten ermöglicht. Das dynamische Modell ermöglicht die Erfassung von Unterschieden in den Ergebnissen und zeigt inwiefern sich Veränderungen auf das Produktionssystem auswirken. Der LCA-Ansatz als standardisierte statische Methode zur Ermittlung von Umweltwirkungen lässt zeitliche Aspekte (Prozesszeiten) außer Acht, wodurch beispielsweise für Emissionen, Durchschnittswerte verwendet müssen. In dynamischen Systemen, in denen sich die Werte ständig verändern, ergibt sich durch die Durchschnittsbildung der Werte eine Ungenauigkeit bei der Berechnung. Außerdem kritisiert Lindskog die Linearität bei den LCA-Berechnungen, wodurch Nachfrageschwankungen nicht detailliert erfasst werden können. Die Simulation ermöglicht es, Systemveränderungen über die Zeit nachzubilden und Berechnungen detaillierter durchzuführen. [Lin11, vergl.]

Möglichkeiten dynamischer Methoden [Lin11, vergl.]

- Erfassung der Auswirkungen von Systemveränderungen
- Auswahl von Ausgabeparametern (Berücksichtigung mehrerer Aspekte)
- Akkurate Ermittlung der Daten von Objekten an jedem Standort und zu jeder Zeit
- Veränderungen im zeitlichen Verlauf sind sichtbar und verfolgbar
- Hohe Anzahl von verschiedenen Szenarien und Produkten möglich

Eine hohe Komplexität von DES-Modellen erschwert den Austausch zwischen Nutzern, Wiederverwendung und die fortlaufende Aktualisierung des Modells. Daher werden standardisierte Simulationsmethoden angestrebt, die eine bessere Wiederverwendbarkeit und Nutzbarkeit gewährleisten können. Durch die Benutzung von exakten Werten und die Vermeidung von Durchschnittswerten kann die Unsicherheit bei den Ergebnisdaten des Modells reduziert werden. Ein Nachteil der ereignisdiskreten Simulation ist der hohe Zeitaufwand zur Datensammlung.

Datensammlung

Bei der Datensammlung wird bestimmt, welche Daten für das Produktsystem und die ablaufenden Prozesse benötigt werden, welches die verfügbaren und verwendeten Datenquellen sind und welche Daten in welcher Form zur Berechnung genutzt werden. Es wird im Weiteren der Umfang der Eingangsdaten je nach Anwendungsfall festgelegt. Für die einzelnen Produktphasen im Lebenszyklus werden die Emissionsquellen erfasst. Für die Anzahl verschiedener Produktvarianten wird betrachtet, welche Daten erforderlich sind und auf welche Weise die Berechnungen (Entfernung, Energieverbrauch) durchgeführt werden können. Es werden Daten zu den Objekten gesammelt und über Datenbanken Emissionsfaktoren für Prozesse und Materialien herangezogen. Bei der Datensammlung wird berücksichtigt, welche Art, Menge und Qualität die Daten aufweisen müssen, um ein ausreichend genaues Ergebnis mit dem Modell zu erreichen.

DES-Methode

Zur Analyse eines realistischen dynamischen Systems wird ein DES-Modell verwendet. Nachdem ein Konzeptmodell mit Daten aus dem Produktsystem erstellt wurde, wird die Evaluierung von Emissionsfaktoren für Prozesse und deren Objekte vorgenommen. Relevante Eingangsdaten werden in das Modell importiert. Die Berechnung der CO₂e-Werte erfolgt für jedes individuelle Produkt.

Vereinfachungen und Annahmen werden verwendet um die Komplexität von Komponenten zu verringern und sofern das Simulationsergebnis dadurch nicht verfälscht wird.

- statische Werte (Vereinfachungen)
- Durchschnittswerte mit Standardabweichungen
- dynamische Werte (hoher Detailgrad)

Bei der Ereignisdiskreten Simulation ist die Umweltwirkung für jede einzelne Artikelart bestimmbar. Es liegt eine Variation bei den Ergebnissen für jedes Produkt, was das Produktsystem durchläuft, vor. Beim LCA-Ansatz sind die Ergebnisse für das System produktspezifisch. Die Simulation wird empfohlen, wenn bereits ein Modell für den Anwendungszweck vorhanden ist und eine Optimierung des Systems als Ziel definiert wurde. Um mit Hilfe der Simulation einen LCA zu erstellen, ist eine standardisierte Methode mit einem Simulationstool erforderlich. Des Weiteren ist eine strukturierte Vorgehensweise für die Berechnung und der Allokation von CO₂e-Werten für die einzelnen Artikel notwendig um später eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.[Lin11, vergl.]

4. Skoogh

In dem wissenschaftlichen Papier „A Methodology for input data management in discrete event simulation projects“ wird ein strukturiertes Vorgehen für das Datenmanagement bei DES-Projekten vorgestellt. Das Datenmanagement stellt hohe Anforderungen an die Qualität der Eingangsdaten bei der Ereignisdiskreten Simulation. Ein großer Zeitanteil wird

für das Datenmanagement innerhalb der Simulationsstudie benötigt. Als Bestandteil einer Simulationsstudie zur Verwendung von DES für die Analyse eines dynamischen Produktsystems wird eine Methode für ein effizientes Datenmanagement beschrieben. Die Methode beschreibt das Vorgehen zur Identifikation, zum Sammeln und zur Vorbereitung von Eingangsdaten für die Simulationsmodelle (DES). Ein strukturiertes Vorgehen ermöglicht die Phase des Datenmanagements zu beschleunigen und die Qualität der Daten zu steigern. Für das Sammeln von Eingangsdaten werden Datenquellen benötigt, die qualitativ und für die Simulation passende Daten bereitstellen. Es wird eine Kategorisierung der Daten je nach Verwendungszweck in der Simulation durchgeführt und für die Simulation in geeignete Daten umgewandelt. [Sko08]

Eingangsdatenphasen

- Identifikation, Definition relevanter Parameter und Festlegung der Anforderungen, Spezifikationen (Detailgrad)
- Erfassung der Daten - Identifikation der Datenquellen
- Analyse - Validation der Daten
- Speicherung/Nutzung

Benötigte Daten werden in drei unterschiedliche Klassen nach Robinson and Bhatia 1995 unterteilt:

- **Fall A:** Verfügbar
- **Fall B:** Nicht verfügbar, aber messbar
- **Fall C:** Nicht verfügbar und nicht messbar (Annahmen notwendig)

Für die Datensammlung werden die Daten in ihrer Verfügbarkeit unterschieden. Unter günstigen Voraussetzungen sind die benötigten Daten vorhanden und können in ein für die Simulation geeignetes Format umgewandelt werden. Unter nicht so günstigen Voraussetzungen sind die Daten noch nicht verfügbar, können aber gemessen werden, was einen höheren Aufwand zur Beschaffung zur Folge hätte. Im schlechtesten Fall sind die Daten weder vorhanden, noch ist eine Messung möglich. Sofern nicht anders möglich müssen Annahmen getroffen werden, die die Unsicherheit der Ergebnisse der Simulation erhöhen und den Detailgrad verschlechtern. Für bestimmte Prozesse und Komponenten sind solche Vereinfachungen möglich, wenn der Einfluss dieses Datenbestandteiles als gering eingeschätzt wird. [Sko08]

6 Datenmodell

6.1 Modellierung

Unter einem Logistiknetzwerk wird ein „Modell zur Abbildung der Grundstruktur von Logistiksystemen“ verstanden. Es lässt sich als Geflecht von Quelle-Senke-Beziehungen darstellen, in welchem Transport-, Lager- und Umschlagsprozesse zur Raum- und Zeitüberbrückung ablaufen [KKK12, vergl. S.399] [Pfo10]. Ein Logistiknetzwerk besteht aus Knoten, die Kapazitäten oder Kompetenzen repräsentieren. Die Knoten des Ressourcennetzes sind miteinander durch ein Gewebe von Flüssen und Prozessen verbunden.

Unter Flüssen werden materielle Objekte, wie zum Beispiel Konsumgüter, betrachtet. Bei Prozessen handelt es sich um immaterielle Objekte wie beispielsweise Informationen. [Kla02] Jedes logistische System dient „der raumzeitlichen, art- und mengenmäßigen Veränderung von Güterbeständen und -strömen.“ [BI97, S.645] Das logistische Netzwerk der Distributionslogistik wird in Knoten und Kanten untergliedert und ein Datenmodell zur Berechnung des Carbon Footprint erstellt. In dem Netzwerk sind die einzelnen Knoten durch Kanten verbunden, worüber Objekte von der Quelle bis zur Senke geführt werden. Die Knoten entsprechen Lager oder Umschlagspunkten. An diesen Punkten laufen Lager-, Speicher- sowie Umschlagsprozesse ab. Die Kanten stellen den Transport von Gütern dar. Hierbei werden Bewegungsprozesse des Transportmittels untersucht, aber auch Lagerprozesse der Objekte innerhalb der Transporteinheit in Betracht gezogen.

Je nach Struktur des Distributionssystems und abhängig vom Start- und Zielort der Objekte, durchläuft ein Objekt einen variablen Weg über Knoten und Kanten im System von der Quelle bis zur Senke. Als Quelle wird der Lieferpunkt bezeichnet, an dem die Güter bereitgestellt werden. Als Senke wird der Empfangspunkt bezeichnet, an dem die Güter verwendet werden. Verschiedene Kantenverbindungen stellen die unterschiedlichen Transportrouten dar. Hierbei ist entscheidend wie groß die Distanz zwischen zwei Knoten ist (Raumänderung) und welche Zeit das Objekt für den Weg benötigt (Zeitänderung). Nicht nur die raum- und zeitmäßigen Veränderungen eines Objektes müssen berücksichtigt werden, sondern auch inwiefern sich das Objekt mengen- und artmäßig verändert. [Pfo10, vergl. S.9]

Um Zustandsveränderungen von Objekten zu erfassen, müssen diese bestimmbar sein. Für das Modell wird eine Bestandseinheit für jede Artikelart definiert. Die Bestandseinheit, auch als Stock Keeping Unit (SKU) benannt, beschreibt die kleinste Einheit eines Artikels. Jede Artikelart ist durch Attribute bestimmbar und bekommt eine feste Identifikationsnummer (ID) zugewiesen. Für die Artikelarten werden im Verlauf von der Quelle bis zur Senke Veränderungen erfasst und ein CO₂e-Wert berechnet und zugeteilt. Zur Erfassung des Carbon Footprint eines Produktes in der Distributionslogistik wird das Netzwerk zur Nachbildung in einem Modell in verschiedene Komponenten aufgeschlüsselt. [Kai13, vergl.] Das System durch die folgenden vier Hauptelemente beschrieben: [KKK12, vergl. S. XX]

1. **Knoten** | Lagerpunkte und Umschlagsstationen

2. **Kanten** | Transportverbindung
3. **Objekt** | Artikel (SKU_{ID})
4. **Carrier** | Transportmittel (Transporteinheit)

Zur Modellierung des Distributionssystems werden Elemente der Graphentheorie nach Diestel verwendet. Demnach wird das System als Graph dargestellt und die Ecken eines Graphen als *Knoten* bezeichnet. Die Ecken werden als Punkte dargestellt und die Verbindung von zwei Punkten durch eine Linie wird als *Kante* benannt. [Die10, vergl.] Als Knoten werden alle physischen Standorte definiert. Der Knotenmenge werden alle Standorte des Transportnetzes wie zum Beispiel Depots (Lager) und Umschlagspunkte (Hubs) eines Distributionsnetzwerkes zugeordnet. [BC09, vergl. S.104]

Durch die Darstellung mit Hilfe von Kanten und Knoten, die in der Anordnung variabel sind, werden die dynamischen Aspekte eines logistischen Netzwerkes als Fließsystem berücksichtigt. Über das Netzwerk von Transportkanten und Informationskanten werden logistische Objekte wie Güter, Informationen und Dienstleistungen geführt. Bei der vorgesehenen Modellierung der Distributionslogistik stellen die Kanten Transporte zwischen den einzelnen Standorten dar. Dabei symbolisiert die Linie zwischen zwei Punkten die prinzipielle Transportverbindung und nicht unbedingt den aktuell durchgeführten Transportvorgang. [BC09, vergl. S.106] Den Transport auf einer Transportroute übernimmt der Carrier, der ein Transportmittel mit der Transporteinheit darstellt und die Artikel von einem Knoten zu einem anderen Knoten im System befördert.

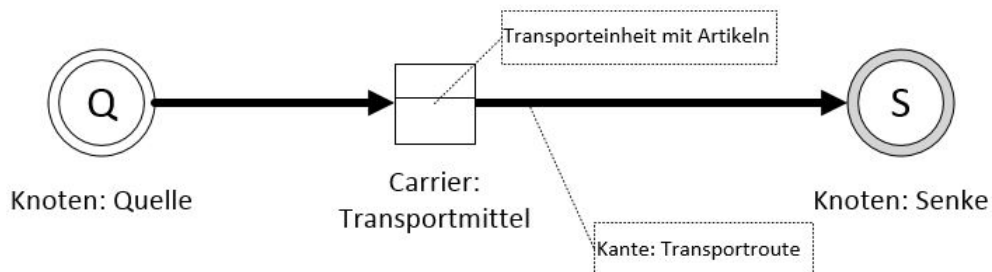


Abb. 6.1: Modellierung für eine Transportverbindung (eigene Darstellung)

Die Kanten stellen alle Aktivitäten zum Transportieren und Fördern von Objekten dar. In den Knoten des logistischen Systems werden Prozesse zum Puffern, Lagern und Umschlagen von Objekten dargestellt. Nach dem Schema von Pfohl(2010)/Jünemann(1980) erfolgt eine Zuordnung von Logistikprozessen zu Arten der Gütertransformation, die sie bewirken. [Pfo10, vergl. S.7] Die Grundfunktion eines logistischen Systems ist wie benannt die raumzeitliche Veränderung der Güter. Durch das Lagern wird eine Zeitänderung bzw. Zeitüberbrückung bewirkt.

Lagern oder Lagerung ist nach [VDI 2411] „jedes geplante Liegen von Arbeitsgegenständen im Materialfluss“ [JS99, S.41]. Das Transportieren von Objekten bewirkt eine Raumänderung. In der Logistik bedeutet das, dass der räumliche Standort sich verändert und eine Transportdistanz überwunden wird. Umschlagsprozesse bewirken durch Auflösen und Zu-

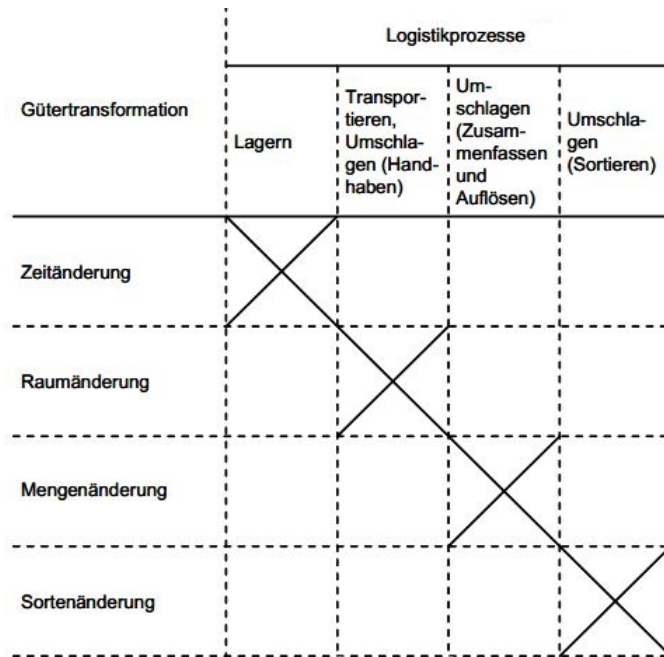


Abb. 6.2: Gütertransformation durch Logistikprozesse (Eigene Anpassung) [Pfo10, S.9]

sammenfassen von Produkten eine Mengenänderung der betrachteten Einheit. Des Weiteren erfolgt durch Sortierprozesse eine Sortenänderung von Gütern. Es verändert sich die Zusammensetzung eines Gutes wie beispielsweise bei der Kommissionierung. [Pfo96, vergl.]

Ein Logistiksystem ist ein System zur raum-, zeit-, art- und mengenmäßige Veränderung von Gütern. Wir definieren für das Logistiksystem bzw. Distributionssystem als ein Netzwerk von Knoten und Kanten. Bei der folgenden Modellierung werden Attribute und Parameter für die Transportkante, Logistikknoten, Carrier (Transportmittel) und die zu transportierenden Artikel (SKU_{ID}) bestimmt. Nachdem eine Modellierung der Distributionslogistik erfolgt ist, werden den Objekten Parameter und Attribute zugeordnet und Berechnungsmethoden für den Carbon Footprint beschrieben. Die Modellierung und Erstellung des Datenmodells wurden auf Grundlage des wissenschaftlichen Papiers „A data model for Carbon Footprint Simulation in Consumer Goods Supply Chains“ [Kai13] entwickelt.

Als Parameter werden Übergabewerte bezeichnet, die Einfluss auf das Ergebnis der Simulation nehmen. Parameter ermöglichen über unterschiedliche Einstellungen (Grenzwerte und Vorgaben) die Flexibilisierung des Modells und die Simulationsdurchführung unterschiedlicher Szenarien. Bei Parametern werden externe und interne Parameter unterschieden. Externe Parameter werden durch den Anwender gesetzt. Interne Parameter werden durch das Programm selbst bestimmt.

Unter einem Attribut wird die „inhärente Eigenschaft oder das einer Instanz innewohnende Merkmal, die oder das mittels menschlicher oder automatisierter Mittel quantitativ oder qualitativ unterschieden werden kann“ verstanden. [DIN13b] Mit Parametern und Attributen werden die Eigenschaften der Transportroute, der Transportmittel, der Transporteinheit und der Bestandseinheit (SKU_{ID}) festgelegt. Den Objekten werden eindeutige Identifikationsnummern zugewiesen. [DIN13b, vergl.]

6.2 Berechnungsansatz

6.2.1 Transportkante

Die Transportkante stellt die Verbindung zwischen zwei Logistikknoten dar. Die Verbindung kann durch Umschlagsstationen unterbrochen sein, wo eine Mengen- und Sortenänderung der zu transportierenden Güter durch Beladung, Entladung, Umladung oder Aufspaltung möglich ist. Für den Transport liegt in jedem Fall eine Raum- und Zeitveränderung vor, die erfasst werden muss. Bei der Parametrisierung der Transportkante wird zunächst die Transportroute selbst berücksichtigt. Dabei werden die Koordinaten des Start- und Zielpunktes des jeweiligen Transportes mit Hilfe der x-y-z-Koordinaten festgelegt. Durch die z-Koordinate wird der Höhenunterschied beschrieben.

Zur Berechnung des Energieverbrauches des Transportmittels für die Transportstrecke ist die zurückgelegte Strecke zwischen Start- und Zielort und der spezifische Verbrauch des Transportmittels bedeutend. Dazu wird der spezifische Energieverbrauch des Transportmittels pro Entfernungseinheit angegeben und mit der Transportdistanz multipliziert. Wird die Transportstrecke durch Umschlagsstationen unterbrochen, wird für die einzelnen Stationen die Koordinaten verwendet um für die Teilstrecken die Distanz und den Energieverbrauch zu berechnen. Der Energieverbrauch muss bereits in Form von Kohlendioxid-Äquivalenten (CO₂e pro Entfernungseinheit) angegeben sein oder eine Umrechnung im Simulationsmodell implementiert werden. Die benötigte Transportzeit für das Transportmittel ergibt sich aus der Distanz der Transportstrecke und der Durchschnittsgeschwindigkeit des Transportmittels, welche durch den Anwender festgelegt wird. In der Transportzeit auch enthalten sind mögliche Standzeiten des Transportmittels.

Wird der Transport mit verschiedenen Transportmitteln von der Quelle bis zur Senke durchgeführt, so wird für jede Teilstrecke transportmittelspezifisch die Durchschnittsgeschwindigkeit und die Transportzeit für jede Teilstrecke bestimmt. Die Transportzeit wird mit dem Basiswert CO₂e je Zeiteinheit des Transportmittels multipliziert. Der Basiswert gibt den Energieverbrauch des Fahrzeuges im Grundbetrieb an. Dadurch werden Stehzeiten des Transportmittels berücksichtigt. Faktoren wie Verkehrsdichte, Wetter- und Tageseinflüsse, Höhenmeterdifferenz (Topographie) sowie infrastrukturelle Wirkungen können in der Durchschnittsgeschwindigkeit mit einfließen. Durch äußere Einflüsse kann die Durchschnittsgeschwindigkeit des Transportmittels verringert werden, was eine höhere Transportzeit zur Folge hat und einen höheren CO₂e-Anteil, durch die Multiplikation mit dem Basisenergieverbrauch, bewirkt. [Wüt10, vergl. S.78]

A1| Parameter Transportkante

Für die Transportkante zwischen einem Startpunkt (Quelle) und Zielort (Senke) werden die Parameter für die Transportroute und das Transportmittel bestimmt. Jedem Parameter wird ein Formelzeichen zugewiesen, die in späteren Berechnungsformeln wiederverwendet werden. Neben der Einheit des Parameters, wird der jeweilige Einfluss des Parameters auf den CO₂e-Wert bei der Berechnung angegeben, was in der Tabelle mit einem **x** angezeigt wird. Wenn ein Parameter ein Allokationsparameter ist, wird dies durch ein **A** in der Tabelle angegeben.

Tab. 6.1: Parameter für eine Transportroute

Transportroute				
<i>Parameter</i>	<i>Formelzeichen</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Einheit</i>	<i>CO₂e</i>
Startpunkt	P_i	Koordinaten (x,y,z)	-	
Zielpunkt	P_j	Koordinaten (x,y,z)	-	
Transportdistanz	$s_{i,j}$	Entfernungseinheit	km, sm ...	x
Transportzeit	$t_{i,j}$	Zeiteinheit	h ...	x
Topographie	$h_{i,j}$	Höhenmeterdifferenz	m ...	x
Umschlagspunkte	U_k	Koordinaten	N	
Energieverbrauch	COU_k	Einheit	CO ₂ e	x
Umschlagspunkt				

Der Startpunkt und Zielpunkt wird für die Berechnung der Transportdistanz verwendet, welche als kürzeste Strecke (Luftlinie) oder exakt mit einem Routenplaner oder vorhandenen Streckenentfernungen berechnet werden kann. Wird die Strecke durch einen Umschlagspunkt unterbrochen, so wird zuerst die Teilstrecke vom Startpunkt bis zum Umschlagspunkt berechnet und der zugehörige CO₂e-Wert den Artikeln zugewiesen und danach die nächste Teilstrecke berechnet. Bei der folgenden Teilstrecke ist der verwendete Umschlagspunkt dann der Startpunkt gilt und die Teilstrecke wird bis zum nächsten Umschlags- oder Zielpunkt berechnet. Eine Teilstrecke erfolgt immer zu einem Standpunkt, wo eine Mengenänderung beim Transportmittel erfolgt oder das Transportmittel gewechselt wird. Die Transportzeit ergibt sich aus der Transportstrecke und der angegebenen Durchschnittsgeschwindigkeit des Transportmittels. Die Höhenmeterdifferenz zwischen Start- und Zielort nimmt Einfluss auf die Durchschnittsgeschwindigkeit des Transportmittels. Ist die Höhenmeterdifferenz im Durchschnitt positiv, dann wird um einen spezifischen Faktor die Durchschnittsgeschwindigkeit verringert. Dadurch das der Basisenergieverbrauch des Transportmittels mit der Transportzeit gekoppelt ist, erhöht sich dadurch der berechnete CO₂e-Wert für die Teilstrecke. Bei einer negativen Höhenmeterdifferenz wird die Durchschnittsgeschwindigkeit nicht verändert, da ein Gefälle keinen Geschwindigkeitsvorteil bewirkt. Der Zielort wird als Umschlagspunkt bzw. Entladepunkt betrachtet. An diesem logistischen Knoten erfolgt eine Beladung und Entladung, wofür ein fixer spezifischer Energieverbrauch des Umschlagsstandortes in Kohlendioxid-Äquivalenten angerechnet wird.

A2| Parameter Transportmittel

Als zweite Kategorie werden Parameter für das Transportmittel gesetzt. Dazu gehören die Transportarten, die vom Start- bis zum Zielort verwendet werden. Unterschieden werden die vier Kategorien Straßen-, See-, Flug- und Schienenverkehr. Werden verschiedene Transportmittel entlang einer Transportkante verwendet, muss für jede Teilstrecke die Transportart definiert werden und für jede Teilstrecke die Parameter und Attribute für die jeweilige Transportroute und vom eingesetzten Transportmittel angegeben werden. Zur Betrachtung des Energieverbrauches eines Transportmittels werden zur Berechnung zwei Beladungszustände des Transportmittels berücksichtigt. Wenn das Transportmittel nicht leer ist, also Güter transportiert werden, wird der Energieverbrauch (voll) für die

Tab. 6.2: Parameter für ein Transportmittel einer Transportkante

Transportmittel				
<i>Parameter</i>	<i>Formelzeichen</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Einheit</i>	<i>CO₂e</i>
Transportart	$ta_{i,j}$	Land, See, Luft	N	x
Energieverbrauch (voll)	CTV_{ta}	Strom, Kraftstoff	CO ₂ e m pro EE	x
Energieverbrauch (leer)	CTL_{ta}	Strom, Kraftstoff	CO ₂ e m pro EE	x
Energieverbrauch (Basis)	CTB_{ta}	Strom, Kraftstoff	CO ₂ e m pro ZE	x
Energieverbrauch (Temperatur)	$CTT_{ta,z}$	Energie	CO ₂ e m pro ZE	x
Transportgeschwindigkeit	\bar{V}_{ta}	Durchschnittsgeschwindigkeit	V	x
Ladungsdistanz	$s1_{i,j}$	beladener Zustand	km, sm ...	x
Leerfahrtendistanz	$s0_{j,i}$	leerer Zustand	km, sm ...	x

Transportstrecke benutzt, die das Transportmittel beladen zurückgelegt hat. Die Leerfahrten werden mit dem Energieverbrauch (leer) und der zurückgelegten Strecke im leeren Zustand zu dem CO₂e-Gesamtwert der Teilstrecke für das Transportmittel angerechnet. Die Leerfahrtendistanz kann die Strecke des Transportmittels vom Zielort zum Startort zurück sein. Wenn keine Leerfahrt vorliegt, dann fällt der CO₂e-Anteil entsprechend weg. [Kai13]

Die Berechnung des Energieverbrauches für ein Transportmittel ($COT_{i,j}$) und die jeweilige Teilstrecke ($t_{i,j}$) vom **Startpunkt i** bis zum **Zielpunkt j** erfolgt nach der Formel:

$$COT_{i,j} = (CTB_{ta} \cdot t_{i,j}) + (CTV_{ta} \cdot s1_{i,j}) + (CTL_{ta} \cdot s0_{j,i}) + (COU_k)$$

Der Energieverbrauch für eine Transportstrecke durch ein Transportmittel setzt sich aus den Bestandteilen: spezifischer Energieverbrauch (voll) [CTV_{ta}] und spezifischer Energieverbrauch (leer) [CTL_{ta}] zusammen, die jeweils mit der jeweiligen Entfernung multipliziert werden. Zusätzlich fließt der Basisenergieverbrauch des Transportmittels [CTB_{ta}] in die Berechnung mit ein. Der Basisenergieverbrauch wird in CO₂e pro Zeiteinheit angegeben und mit der Transportzeit multipliziert. Der Basisenergieverbrauch definiert sich als Grundverbrauch, den ein Transportmittel im Betrieb aufweist, auch wenn keine Fortbewegung stattfindet. Zusätzlich wird noch der Energieverbrauch für den Umschlagspunkt am Zielort angerechnet.

Der Energieverbrauch für bestimmte Temperaturzonen im Transportmittel wird separat berechnet, sofern das Transportmittel Zonen mit erhöhtem Energieverbrauch besitzt. Für eine Temperaturzone (Kühlung, Heizung) oder klimatisierte Zone (Luftfeuchtigkeit, Lüftung) ergibt sich der CO₂e-Wert über die Zeit nach der Formel:

$$COZ_{ta,z} = CTT_{ta,z} \cdot t_{i,j}$$

Der Gesamtenergieverbrauch wird für jede Zone (z) einzeln berechnet und ergibt sich aus der Multiplikation des spezifischen CO₂e-Wert pro Zeiteinheit der Zone [$CTT_{ta,z}$] mit der

Transportzeit $t_{i,j}$ für die Teilstrecke von i nach j . Die Allokation vom $COT_{i,j}$ und dem $COZ_{ta,z}$ erfolgt unabhängig voneinander zu den einzelnen Artikeln. Der $COZ_{ta,z}$ -Wert wird nur den in der Zone gelagerten Artikeln nach dem Volumen oder Stückzahl zugewiesen, während der $COT_{i,j}$ für alle transportierten Artikel nach dem Gewicht zugeteilt wird.

A3 | Parameter Bestandseinheit (SKU_{ID})

Die dritte Kategorie ist die der Bestandseinheit (SKU_{ID}). Die Attribute sind zentral im System gespeichert und werden nicht spezifisch für den Transport oder das Lager bestimmt. Von Bedeutung ist, an welchem Standort, welcher Artikel (SKU_{ID}), in welcher Stückzahl N und mit welchem kumulierten CO_2e -Wert je Artikelart vorliegt.

Für die Bestandseinheit SKU_{ID} sind die Eigenschaften wie Volumen und das Gewicht von Bedeutung. Das Gewicht wird weiter in Netto- und Bruttogewicht unterschieden. Beim Bruttogewicht wird anteilig das Gewicht der Ladehilfsmittel berücksichtigt. Für alle Artikel im Produktsystem wird entweder das Netto- oder das Bruttogewicht genutzt. Für die weiteren Betrachtungen wird das Nettogewicht eines Artikels mit Verpackung, aber ohne das anteilige Gewicht des Ladehilfsmittels genutzt. Das Volumen und das Gewicht werden als Allokationsparameter für die Zuteilung der berechneten CO_2e -Werte eingesetzt. Die Temperaturanforderung einer SKU_{ID} gibt an, ob der jeweilige Artikel in einer Temperaturzone bzw. Klimazone transportiert werden muss.

Tab. 6.3: Parameter für die jeweilige Bestandseinheit

Bestandseinheit (SKU_{ID})				
<i>Parameter</i>	<i>Formelzeichen</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Einheit</i>	<i>CO₂e</i>
Maße	V_{ID}	Volumen	m ³ , l ...	A
Nettogewicht	$m0_{ID}$	Gewicht	kg ...	Ax
Bruttogewicht	$m1_{ID}$	Gewicht	kg ...	Ax
Temperaturanforderung	T_{ID}	Anforderung	boolean (0,1)	x

Wenn die Berechnung des $COT_{i,j}$ und $COZ_{ta,z}$ für die Teilstrecke und das jeweilige Transportmittel durchgeführt wurde, erfolgt die Allokation des CO_2e -Wertes zu den Artikeln (SKU_{ID}), was in dem Kapitel Allokation erklärt wird.

6.2.2 Transportknoten

Für den Transportknoten werden die Parameter für den logistischen Knoten (Lager) gesetzt. Die Attribute für die dort gelagerten Bestandseinheiten (SKU_{ID}) sind zentral im System vorhanden. Als Transportknoten gilt ein Standort, wo Lagerprozesse zur Zeitüberbrückung stattfinden.

B1 | Parameter Transportknoten

Für den jeweiligen Standort wird ein Basisenergieverbrauch in CO_2e pro Zeiteinheit [CLB_{ta}] angegeben. Dieser Wert umfasst den Gesamtverbrauch des Lagers und beinhaltet verschiedene Energieverbräuche, wozu die Förderanlagen, der innerbetriebliche Transport, die Um-

Tab. 6.4: Parameter einen Transportknoten

Lager				
<i>Parameter</i>	<i>Formelzeichen</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Einheit</i>	<i>CO₂e</i>
Lager	la_m	Lagerstandort	-	*
Energieverbrauch (Basis)	CLB_{la}	Energie	CO ₂ e pro ZE	x
Energieverbrauch (Temperatur)	$CLT_{la,z}$	Energie	CO ₂ e pro ZE	x
Lagerzeit	t_{la}	Zeiteinheit	h ...	x

schlaganlagen, die Beleuchtung, die Informationstechnik etc. zugeordnet werden können. Der CO₂e-Wert für das Lager wird nach der folgenden Formel berechnet:

$$COL_m = CLB_{la} \cdot t_{la}$$

Der CO₂e-Wert ergibt sich aus der Multiplikation des spezifischen Kohlendioxid-Äquivalentenwert des Lagers pro Zeiteinheit mit der Lagerzeit. Die Lagerzeit, ist der Zeitraum, wo keine Mengenänderung im Lager oder Lagerraum stattgefunden hat. Kommt es zu einer Mengenänderung wird zu diesem Zeitpunkt die Berechnung und Allokation des CO₂e-Wertes für das Lager durchgeführt. Danach wird der COL_m für den nächsten Zeitraum neu berechnet. Für den Lagerraum werden Lagerzonen nach ihrem Energieverbrauch unterschieden. Berücksichtigt werden gekühlte, beheizte oder klimatisierte Lagerzonen, die sich durch einen zusätzlichen Energieverbrauch und einen höheren CO₂e-Anteil auszeichnen. Die Lagerzonen unterscheiden sich beispielsweise durch die Art der Klimatisierung. Einzelne Lagerzonen können unterschiedlich erforderliche Temperaturen aufweisen. Für Kühllager beziehungsweise Kühllagerzonen werden drei Temperaturbereiche unterschieden:

Beispiel für eine mögliche Kühlzoneneinteilung: [Lag13, vergl.]

1. Temperatur 4 bis 18 Grad Celsius („Kühl lagern“)
2. Temperatur -18 bis 4 Grad Celsius („gekühlt lagern“)
3. Temperatur -18 Grad Celsius oder weniger („tiefgekühlt“)

Je größer die Differenz zwischen der Solltemperatur und der Umgebungstemperatur ist, desto höher ist der Energiebedarf der Lagerzone um die gewünschte Temperatur zu erzielen. Hierbei wird der zusätzliche benötigte Energieverbrauch in der Berechnung separat berücksichtigt. Ist der entgegengesetzte Fall erforderlich, dass eine Lagerzone beheizt werden muss, erhöht sich entsprechend auch der Energieverbrauch durch ein betriebenes Heizungssystem im Vergleich zu unklimatisierten Lagerzonen. Für spezielle Produkte im Handel von Nahrungsmitteln ist eine Lagerung bei einer bestimmten Luftfeuchtigkeit erwünscht. Betriebene Lüftungssysteme und weitere Systeme zur Beeinflussung des Lagerklimas (Luftqualität) müssen bei Erfassung des Carbon Footprint beachtet werden. Eine Besonderheit liegt bei klimaneutralen Lager vor. Wird der Energiebedarf durch regenerative Energiequellen bereitgestellt, lässt sich der Anteil an Treibhausgasemissionen für das Lager reduzieren und der Basisenergieverbrauch verringern.

Die Berechnung für die Zonen in einem Lager mit einem erhöhten Energieverbrauch erfolgt nach der Formel:

$$COK_{la,z} = CLT_{la,z} \cdot t_{la}$$

Der Energieverbrauch für eine klimatisierte Zone $[COK_{la,z}]$ berechnet sich aus der Multiplikation des spezifischen Energieverbrauches der Zone $[CLT_{la,z}]$ mit dem betrachteten Zeitraum, wo keine Mengenänderung in dieser Zone vorliegt.

Während beim Transport das Gesamtgewicht der Transportmenge einen entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch des Transportmittels hat, ist beim Lagern ohne Berücksichtigung des innerbetrieblichen Transports das zu lagernde Gewicht für den Carbon Footprint nicht bedeutend. Um eine Allokation der berechneten CO_2e -Anteile für die gelagerten Güter vorzunehmen, ist eine Allokation nach dem Volumen möglich. Für klimatisierte Zonen kann eine Allokation nach der Stückzahl vorgenommen werden, wenn eine zusätzliche Allokation nach dem Volumen zu aufwendig erscheint.

B2 | Parameter Bestandseinheit (SKU_{ID})

Wie bei der Transportkante werden die Attribute der Bestandseinheiten (SKU_{ID}) für die spätere Allokation benötigt. Die Allokation erfolgt bei allen Lagerprozessen nach dem Volumen der Artikel.

Tab. 6.5: Parameter für die jeweilige Bestandseinheit

Bestandseinheit (SKU _{ID})				
<i>Parameter</i>	<i>Formelzeichen</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Einheit</i>	<i>CO₂e</i>
Maße	V _{ID}	Volumen	m ³ , l ...	A
Nettogewicht	m0 _{ID}	Gewicht	kg ...	Ax
Bruttogewicht	m1 _{ID}	Gewicht	kg ...	Ax
Temperaturanforderung	T _{ID}	Anforderung	boolean (0,1)	x

Während beim Transport die Raum- und Zeitänderung den Energieverbrauch bestimmen, besitzt bei Lagerprozessen die Zeitänderung einen Einfluss auf den Energieverbrauch. Je länger Artikel sich in einem Lager befinden, um so mehr steigt der CO_2e -Wert. Um eine Allokation des CO_2e -Anteils vorzunehmen, muss bei einer Allokation nach dem Volumen, die Maße des Produktes bekannt sein. Wird die Allokation nach der Stückzahl vorgenommen, muss entsprechend die Bestandseinheit (SKU) und die zugehörige Stückzahl an dem Standort angegeben sein. Als weiteres Attribut des Lagergutes ist eine Angabe für bestimmte Lageranforderungen notwendig. Artikel mit Temperaturanforderungen müssen entsprechend deklariert werden und in einer Lagerzone zugeteilt werden, die die Anforderung erfüllt. Die CO_2e -Anteile werden zentral im System für jede Artikelart (SKU_{ID}) und für den jeweiligen Standort gespeichert.

6.2.3 Zusammenfassung

Nachdem das Distributionssystem in einem Modell nachgebildet wurde und für die einzelnen Komponenten des Simulationsmodells die notwendigen Attribute und Eingangsgrößen

festgelegt worden sind, erfolgt die Berechnung des Carbon Footprint mit Hilfe der Simulation. Die Berechnung wird für die beiden Prozesse Transport und Lager unterschieden. Die spezifischen kumulierten CO₂e-Werte werden für jeden Standort und für jede Artikelart (SKU_{ID}) mit der zugehörigen Stückzahl global im System gespeichert. Die SKU-Informationen sind zu jeder Zeit abrufbar und werden fortlaufend aktualisiert.

Standort	Artikel (SKU _{ID})	Stückzahl(SKU _{ID})	kumulierter CO ₂ e (SKU _{ID})
Logistikknoten Transportverbindung	spezifischer Artikel (SKU)	NGS _{ID,ORT}	SGS _{ID,ORT}

Die Energieverbräuche liegen für Lagerprozesse, wo die Zeitänderung von Bedeutung ist, in CO₂-Äquivalent pro Zeiteinheit vor. Bei Transportprozessen ist die Raum- und Zeitänderung relevant. Der Verbrauch liegt deswegen in der Form CO₂e je Entfernung- oder Zeiteinheit vor. Die Teilschritte Berechnung und Allokation der CO₂e werden bei jeder Mengenänderung im Transportmittel oder im logistischen Knoten ausgeführt.

Zentral im System werden die Attribute und Eigenschaften aller im Produktsystem befindlichen Bestandseinheiten bzw. Artikelarten (SKU_{ID}) gespeichert. Die Informationen der Artikel werden für die Berechnung und Allokation der CO₂e für die Transport- und Lagerprozesse benötigt.

Transportprozesse Berechnungsschritte

Für die Berechnung des CO₂e für den Transport von Artikeln von der Quelle bis zur Senke müssen die Parameter für die zwei Kategorien gesetzt werden:

1. Transportstrecke
2. Transportmittel

Werden auf einer Transportstrecke mehrere Transportmittel verwendet, so muss für jede Teilstrecke und jedes Transportmittel die entsprechenden Parameter bestimmt werden. Wird eine Transportstrecke durch Umschlagsstationen unterbrochen, wo eine Mengenänderung der Transportmenge stattfindet, dann ergibt sich bei einer Anzahl von \mathbf{n} Umschlagstationen, eine Teilstreckenanzahl von $\mathbf{n+1}$, für die jeweils Parameter gesetzt werden müssen.

Der CO₂e-Gesamtwert für ein Transportmittel ergibt sich aus dem Energieverbrauch, der als CO₂e je Entfernungseinheit vorliegt. Werden während dem Transport verschiedene Kraftstoffe verwendet, wird je nach zurückgelegter Strecke mit dem jeweiligen Kraftstoff der CO₂e-Wert berechnet. Für Transportmittel wird eine Durchschnittsgeschwindigkeit festgelegt, die die Transportzeit beeinflusst, die das Transportmittel benötigt. Neben dem spezifischen Energieverbrauch des Transportmittels pro Entfernungseinheit, wird ein Basisenergieverbrauch des Transportmittels pro Zeiteinheit bestimmt. Dieser beschreibt den Grundverbrauch des jeweiligen Transportmittels im Betrieb.

Der CO₂e-Gesamtanteil für eine Teilstrecke mit einem Transportmittel ergibt sich aus der Summe von dem spezifischen CO₂e-Basiswert pro Zeiteinheit des Transportmittels multipliziert mit der Transportzeit plus dem spezifischen Energieverbrauch (Transportmittel,

Kraftstoff, beladen, unbeladen) multipliziert mit der Entfernung plus dem CO₂e-Anteil des Umschlagspunktes.

$$COT_{i,j} = (CTB_{ta} \cdot t_{i,j}) + (CTV_{ta} \cdot s_{1i,j}) + (CTL_{ta} \cdot s_{0j,i}) + (COU_k)$$

Die Berechnung der Transportstreckendistanz ergibt sich aus der Berechnung der kürzesten Distanz zwischen Start-, Umschlags- und Zielpunkt. Die Transportzeit lässt sich über die Simulationszeit ermitteln. Die Transportzeit für eine Teilstrecke ist die zeitliche Differenz zwischen Start- und Endzeit, die das Transportmittel benötigt.

Die Berechnung für die Zonen mit erhöhtem Energieverbrauch, wie zum Beispiel Kühl- und Heizzonen und klimatisierte Zonen, erfolgt separat. Der Energieverbrauch wird hier in Form von CO₂e pro Zeiteinheit definiert. Damit wird berücksichtigt, dass auch bei Standphasen das Transportmittel Energie zur Erhaltung einer bestimmten Temperatur benötigt. Der Energieverbrauch für die räumliche Veränderung der Objekte richtet sich dagegen nach dem Beladungszustand des Transportmittels, der Transportgeschwindigkeit und der Transportdistanz.

Der CO₂e-Anteil für Zone mit erhöhtem Energieverbrauch [COZ_{ta,z}] ergibt sich aus der Multiplikation von dem spezifischen CO₂e je Zeiteinheit [CTT_{ta,z}] und die Zeit [t_{i,j}], die für die Teilstrecke vom Transportmittel benötigt worden ist. Dieser Anteil wird für jede Klimazone berechnet, sofern sich der CO₂e je Zeiteinheit voneinander unterscheidet.

$$COZ_{ta,z} = CTT_{ta,z} \cdot t_{i,j}$$

Bei der zweiten Phase der Allokation wird der gesamte, für die Transportstrecke mit einem Transportmittel berechnete, CO₂e-Anteil nach dem Gewicht der SKU_{ID} im Verhältnis zum Gesamtgewicht der Transportmenge gesetzt und den SKU_{ID} zugeteilt. Die Allokation der separaten Ladezonen mit erhöhtem Energieverbrauch erfolgt nach dem Volumen der SKU_{ID} im Verhältnis zu dem in der Zone gelagerten Gesamtvolumen der Bestandseinheiten. Alternativ ist eine Allokation nach der Stückzahl für die Zonen möglich.

Der berechnete CO₂e-Wert wird bei jeder Mengenänderung im Transportknoten oder Transportstrecke berechnet.

Lagerprozesse Berechnungsschritte

1. logistischer Knoten (Lager)

Für einen logistischen Knoten, wo Lagerprozesse ablaufen, werden die Attribute zu dem Lager benötigt. Im Lager ist die Zeitänderung von Artikeln bei der Berechnung und Allokation der CO₂e-Anteile von Bedeutung. Der CO₂e-Anteil wird jeweils für den Zeitraum zwischen Mengenänderungen berechnet. Der CO₂-Wert des Lagers [COL_m] ergibt sich aus dem spezifischen CO₂e je Zeiteinheit des Lagers [CLB_{la}], der mit der Zeitdauer [t_{la}] multipliziert wird.

$$COL_m = CLB_{la} \cdot t_{la}$$

Der CO₂e-Anteil für Zone mit erhöhtem Energieverbrauch [COK_{la,z}] ergibt sich analog zum Transport aus der Multiplikation von dem spezifischen CO₂e je Zeiteinheit (Zone) [CLT_{la,z}]

und die Zeit $[t_{la}]$, die die SKU_{ID} in der Lagerzone sich befindet. Dieser Anteil wird für jede Klimazone berechnet, sofern sich deren CO_2e -Werte voneinander unterscheiden.

$$COK_{la,z} = CLT_{la,z} \cdot t_{la}$$

7 Allokation

7.1 Definition

Die Allokation beziehungsweise die Zuteilung der berechneten Kohlendioxid-Äquivalenten (CO₂e) entlang der Distributionskette zu den verschiedenen Artikeln (SKU_{ID}) erfolgt nach drei Allokationsparametern. Die Allokation wird nach Volumen, Gewicht oder der Stückzahl unterschieden. Nachdem die Kohlenstoffdioxidquellen für die Distributionslogistik bestimmt worden sind, kann eine Berechnung der Treibhausgasemissionen erfolgen und entsprechend in die Einheit der Kohlendioxid-Äquivalente (CO₂e) umgewandelt werden. Die drei Größen Volumen, Gewicht und Anzahl (Stückzahl) werden durch das internationale SI-Einheitensystem (franz. *Système international d'unités*) definiert. [BIP13, vergl.]

Tab. 7.1: SI-Einheiten [BIP07, vergl.][BIP13]

physikalische Größe	Formelzeichen	Einheit	Einheitszeichen	Dimension
Volumen	V	Liter	l	L ³
Masse	m	Kilogramm	kg	M
Anzahl	N, n	Stückzahl	Stk.	1

In der Thermodynamik werden Masse und Volumen und die Stoffmenge (Teilchenanzahl) als extensive Zustandsgrößen beschrieben. Extensive Zustandsgrößen verändern sich bei Teilung eines Objektes. Intensive Zustandsgrößen wie die Temperatur T bleiben unverändert bei der Teilung eines Objektes. Für jeden Standort in dem Produktsystem werden die CO₂e-Werte einer Artikelart (SKU_{ID}) zusammenaddiert. Dadurch ergibt sich ein CO₂e-Gesamtwert pro SKU_{ID} und der zugehörigen Stückzahl. Um für eine Artikelart bzw. eine Bestandseinheit mit der Stückzahl 1 den CO₂e-Wert zu berechnen, wird durch Division des CO₂e-Gesamtwertes der SKU durch die jeweilige Stückzahl der Wert wie folgt ermittelt:

$$SID_{ID} = \frac{SGS_{ID}}{NGS_{ID,ORT}}$$

Wird aus der Gesamtmenge eines Artikels eine bestimmte Anzahl entnommen, kann mit der angegebenen Formel der spezifische CO₂e-Wert angegeben werden. Für die Allokation nach Volumen und Gewicht wird das Gesamtgewicht MGS_{ID} und das Gesamtvolumen VGS_{ID} jeder Artikelart (ID) an einem Standort benötigt.

Gesamtgewicht für die jeweilige SKU_{ID}:

$$MGS_{ID} = m0_{ID} \cdot NGS_{ID,ORT}$$

Gesamtvolumen für die jeweilige SKU_{ID}

$$VGS_{ID} = V_{ID} \cdot NGS_{ID,ORT}$$

Verändert sich die Menge einer Artikelart an einem Standort, dann verändert sich damit entsprechend auch das Gesamtvolumen und Gesamtgewicht der $NGS_{ID,ORT}$. Der zugewiesenen CO_2e -Wert für die SKU_{ID} verändert sich mit der Mengenänderung und kann somit als extensive Zustandsgröße angesehen werden.[Hah10] Extensive Zustandsgrößen lassen sich additiv aus den entsprechenden Zustandsgrößen zusammensetzen. Es gilt:

- $V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$
- $m = m_1 + m_2 + \dots + m_n$
- $N = N_1 + N_2 + \dots + N_n$

Wiederrum analog dazu setzt sich der Wert CO_2e ebenfalls additiv zusammen:

- $CO_2e = CO_2e_1 + CO_2e_2 + \dots + CO_2e_n$

Die Einheit der Kohlendioxid-Äquivalente (CO_2e) wird wie in der Thermodynamik als extensive Zustandsgröße angesehen. Der CO_2e -Wert einer SKU_{ID} ist abhängig von der Masse, Volumen und/oder von der Anzahl, sodass sich bei jeder Mengenänderung der Objekte dieser Wert neu berechnet werden muss. Wenn Artikel aus dem Lager oder Transportmittel entfernt oder hinzugefügt werden, dann verändert sich entsprechend die Menge an dem betrachteten Standort. Das Kohlendioxid-Äquivalent wird wie folgt als Einheit definiert:

Tab. 7.2: Definition Kohlendioxid-Äquivalent

Größe	Formelzeichen	Einheit	Einheitenzeichen	Dimension
Kohlendioxid-äquivalent	CO_2e	Kilogramm	kg ...	M

Die Emission einer metrischen Tonne Kohlenstoffdioxid (CO_2) entspricht einer Tonne Kohlendioxid-Äquivalent (CO_2e). Alle anderen Treibhausgase werden entsprechend über einen Emissionsfaktor in Kohlendioxid-Äquivalent umgerechnet. Für das Datenmodell wird festgelegt, dass die Emissionen als CO_2e als Eingangsdaten vorliegen oder innerhalb des Modells eine Umrechnung möglich ist. Als elementares Treibhausgas wird die Emission von Kohlenstoffdioxid berücksichtigt. Als weitere wichtige Treibhausgase zählen Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW), Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (P-FKW) und Schwefelhexafluorid (SF_6).

Nachdem der gesamte CO_2e -Wert für eine Transportroute oder einem Lager-/Umschlagsknoten berechnet worden ist, erfolgt die Zuteilung zu den Zonen und Objekten nach bestimmten Kriterien. Im Folgenden werden die Allokationskriterien Anzahl, Volumen und Gewicht beschrieben und die Zuteilung der CO_2e -Werte für Objekte in der Distributionslogistik beschrieben.

Nach der Berechnung der CO_2e -Werte für den Transport und Lagerung von Gütern im Distributionsnetzwerk mit Hilfe der Simulation müssen die CO_2 -Anteile zu den einzelnen Artikeln (SKU_{ID}) zugewiesen werden. Dieser Prozess wird als Allokation bezeichnet. Dabei müssen verschiedene Einflussfaktoren berücksichtigt werden und eine Allokationsmethodik entwickelt werden, die es ermöglicht, die CO_2e -Anteile mathematisch korrekt und

fair untereinander aufzuteilen. Zielsetzung der Allokation ist es, dass nach dem Durchlauf durch das Distributionssystem von der Quelle bis zur Senke ein möglichst realitätsnaher CO₂e-Wert jeder Bestandseinheit zugewiesen wurde. Wie bei der Berechnung der CO₂e-Werte sind bei der Allokation einige Vereinfachungen und Annahmen notwendig. Für jeden Artikel (SKU_{ID}) im System wird ein spezifischer CO₂e-Durchschnittswert als Ergebnis berechnet. Beim Durchlauf eines Objektes durch das System, wird dem Objekt durch verschiedene Prozesse ein bestimmter CO₂e-Anteil zugewiesen. Im Folgenden werden die Allokationsparameter wie Stückzahl, Volumen und Gewicht beschrieben und eine Allokationsmethodik entwickelt, die verschiedene Transport- und Lagerstrategien innerhalb der Distributionslogistik berücksichtigt.

7.2 Allokationsparameter

7.2.1 Stückzahl

In der Chemie stellt das Atom die kleinste Einheit eines Elements dar. Es existieren verschiedene Arten von Atomen, die sich in ihrer Masse und Größe unterscheiden. Analog dazu wird in der Distributionslogistik die Bestandseinheit, auch als Stock Keeping Unit (SKU) bezeichnet, als kleinste Einheit definiert. Die Bestandseinheit ist die „primäre oder Basiseinheit eines bestimmten Produkts.“[KKK12, S.535] Die SKU lässt sich durch das Volumen und Gewicht beschreiben und wird durch Attribute genau definiert. Die Stock Keeping Unit wird im Verlauf der Simulation als unveränderlich angesehen. Befinden sich identische Bestandseinheiten des gleichen Artikels an einem Ort, so wird die Anzahl zusammengezählt und der zugehörige CO₂e-Anteil kumuliert. Eine eindeutige Identifikation bei den als Verkaufseinheit fertig verpackten Produkten kann über die Artikelnummer (ID) erfolgen. Die globale Artikelidentifikationsnummer (Global Trade Item Number, GTIN) ist eine durch die GS1 verwaltete Artikelnummer „zur weltweit eindeutigen Identifikation von Produkten und Packstücken“[KKK12, S.208] [Kai13, vergl.]

Attribute der Bestandseinheit (SKU_{ID}) [Gud12a, vergl. S.445]

- **Identifikationsnummer:** Kennnummer der Bestandseinheit
- **Bezeichnung:** technisch-funktionaler Name
- **Außenmaße:** Länge, Breite, Höhe, Durchmesser des maximalen Außenkörpers
- **Volumen:** Berechnung durch Außenmaße
- **Gewichte:** Nettogewicht, Bruttogewicht
- **Anforderungen:** Vorgaben für die Logistikprozesse (Kühlung, Luftfeuchtigkeit)

Die Identifikationsnummer unterscheidet sich für die verschiedenen Artikelgruppen. Jede Artikelart, die eine eigene Identifikations- oder Artikelnummer besitzt, wird durch die Attribute definiert. Zur Allokation wird immer die Gesamtmenge einer Artikelart für jeden Standort (Transportknoten, Transportkante) im System gespeichert. Zusätzlich wird der kumulierte CO₂e-Gesamtwert für jede SKU_{ID} an diesem Standort angegeben.

Tab. 7.3: Datenwerte für jeden Standort im System

Standort A			Standort B		
SKU _{ID}	Stückzahl	CO ₂ e-Ges.	SKU _{ID}	Stückzahl	CO ₂ e-Ges.
ID _n	Stk.	CO ₂ e	ID _n	Stk.	CO ₂ e
...
ID _{n+1}	Stk.	CO ₂ e	ID _{n+1}	Stk.	CO ₂ e

Mit Hilfe der Attribute der SKU_{ID} und der Stückzahl ist eine Allokation der berechneten CO₂e-Werte entlang der Distributionskette zu den Artikelgruppen möglich. Für alle Transportprozesse wird eine Allokation nach dem SKU_{ID}-Gewicht durchgeführt und bei Lagerprozessen nach dem SKU_{ID}-Volumen ausgeführt.

Ein optionaler Bestandteil als Attribut für die SKU_{ID} wäre die Einbindung des kumulierten CO₂e-Wert für die Artikelarten aus vorgelagerten Prozessen. Dieser Eingabewert würde die Prozesse wie Rohstoffgewinnung, Verarbeitung, Produktion etc. beinhalten.

7.2.2 Volumen

Neben der Zuweisung der CO₂e-Anteile nach der Stückzahl eines Produktes, besteht die Möglichkeit, die CO₂e-Anteile volumenspezifisch den Artikeln zuzuweisen. Für alle Lagerprozesse wird die Allokation vorrangig nach dem Volumen durchgeführt. Dazu wird der spezifische Volumenwert für die jeweiligen SKU_{ID} benötigt. Für eine spezifische SKU_{ID} ist das Volumen bekannt oder kann durch die Außenmaße berechnet werden. Für jedes Lager wird über die Stückzahl der SKU_{ID} an diesem Standort und dem aktuellen Zeitpunkt der spezifische Gesamtvolumenwert der berechnet, der diese Artikelart (ID) im Lagerraum in Anspruch nimmt. In den logistischen Knoten ist das Volumen des Lagers der begrenzende Faktor. Artikel, die ein größeres Lagervolumen in Anspruch nehmen, wird ein größerer CO₂e-Anteil zugewiesen.

$$VGS_{ID,ORT} = V_{ID} \cdot NGS_{ID,ORT}$$

Dadurch ergibt sich ein Gesamtvolumenwert, der beschreibt, wie viel Raumvolumen alle Artikel einer Art (ID) im Lager zum aktuellen Zeitpunkt in Anspruch nehmen. Dabei ist es unerheblich, wo exakt die Artikel lagern oder in welcher logistischen Einheit die Artikel gelagert werden. Artikel mit speziellen Lageranforderungen, die in separaten Lagerzonen (Temperatur, Klimatisierung) gelagert sind, wird der zusätzliche Energieverbrauch nach dem Volumen oder nach der Stückzahl zugeteilt. Angenommen wird, dass Artikel der gleichen Art entweder alle eine oder keine Temperaturanforderung besitzen. Sollte dies nicht der Fall sein, müssen den Artikeln der gleichen Art unterschiedliche Identifikationsnummern zur Unterscheidung zugewiesen werden.

Die maximale Laderaumkapazität wird nicht berücksichtigt. Für die Energieverbrauchsrechnung ist es unerheblich, wie stark das Lager ausgelastet ist. Der Gesamtenergieverbrauch ist so angesetzt, dass der Energieverbrauch fast dem Maximum entspricht und somit ein Lager mit vielen gelagerten Artikeln bzw. hoher Auslastung vorteilhaft ist. Der Auslastungsgrad des Lagers kann als optionaler Faktor in die Rechnung mit einfließen. Dabei wird das Verhältnis von maximal verfügbares Lagerraumkapazität zum aktuell belegtes

Lagervolumen berechnet. Durch eine hohe Auslastung nähert sich der Auslastungsfaktor dem Wert 1 an, was in der Energieberechnung positiv berücksichtigt wird. Der Auslastungsfaktor lässt sich als optionaler Multiplikator zum Basisverbrauch nutzen.

$$\text{Auslastungsfaktor} \cdot \text{Volumen} = \frac{\text{Lagervolumen}}{\text{Gesamtvolumen} \cdot \text{SKU}}$$

7.2.3 Gewicht

Bei allen Transportprozessen zwischen den logistischen Knoten wird eine Allokation der beim Transport entstehenden CO₂e-Anteile zu den SKUID durchgeführt. Je nach Zuladungsgewicht des Transportfahrzeuges verändert sich der Energie- bzw. Treibstoffverbrauch und damit verbunden die Emission von Treibhausgasen. Für Lagerprozesse ist die Allokation von CO₂e-Anteilen nach dem Produktgewicht nicht sinnvoll, weil kein direkter Zusammenhang zum Energieverbrauch des Lagers besteht. Für Umschlagsprozesse wäre eine Berücksichtigung des Gewichtes möglich, doch der mögliche Aufwand zur Zuteilung und Erfassung des exakten Kohlendioxid-Äquivalente zu hoch. Bei Bewegungen im Raum hat das Gewicht der zu bewegenden Objekte einen entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch und den Ausstoß von Treibhausgasemissionen. Das Gewicht eines Transportmittels setzt sich aus dem Leergewicht des Transportmittels und der aktuellen Zuladung zusammen. Das zulässige Gesamtgewicht des Transportmittels darf nicht überschritten werden.

Der Energieverbrauch wird beim Transportmittel nicht nach der exakten Zuladung ermittelt, sondern die beiden Zustände **Transportmittel beladen** oder **Transportmittel leer** unterschieden. Der Energieverbrauch für den beladenen Zustand entspricht dabei einem Wert, bei dem das Transportmittel fast eine maximale Beladung besitzt. Es wird nicht das exakte Zuladungsgewicht des Transportmittel berücksichtigt, sondern der Verbrauch für die maximale oder sehr hohe Nutzlast festgesetzt. Das hat zur Folge, dass sich eine höhere Auslastung des Transportmittels positiv auf den Carbon Footprint auswirkt.

Full-Transport-Load (FTL) Transportmittel ist voll beladen (Gewicht oder Volumen)

Less-Transport-Load (LTL) Transportmittel ist nicht voll beladen

Empty-Transport-Load (ETL) Transportmittel ist nicht beladen (Leerfahrt)

Bei der Berechnung des Energieverbrauches eines Transportmittels wird nicht nach FTL und LTL unterschieden, sondern immer der Verbrauch des Transportmittels für den Beladungszustand FTL angenommen und verwendet. Der berechnete CO₂e-Wert für den Transport wird dann nach dem Gesamtgewicht der einzelnen SKU(ID) aufgeteilt. Das Gesamtgewicht der jeweiligen Artikelart ergibt sich aus der Stückzahl des Artikels (ID), der transportiert wird und dem Einzelgewicht der Bestandseinheit. Das Gesamtgewicht muss demnach für alle transportierten Artikel berechnet werden.

$$MGS_{ID,ORT} = m0_{ID} \cdot NGS_{ID,ORT}$$

Für das Transportmittel wird ein Energieverbrauch (Treibstoffverbrauch) für die Maximalbeladung genutzt, wenn das Transportmittel nicht leer ist. Die einzelnen Gewichte der

aktuell zu transportierten Artikel wird nicht bei der Berechnung genutzt, sondern nur bei der Allokation berücksichtigt. Dadurch erfolgt indirekt eine Optimierung der Kapazitäten beim Transportmittel. Ist das Transportmittel nicht beladen und erfolgt somit eine Leerfahrt, wird der Energieverbrauch (Treibstoffverbrauch) für den leeren Zustand genutzt und zu dem Gesamt-CO₂e-Wert hinzugefügt und zu den transportierten Einheiten aufgeteilt. Damit verbunden wird eine Minimierung von Leerfahrten angestrebt. Reicht die bereitgestellte Kapazität des vorhandenen Transportmittel nicht aus um alle Artikel zu transportieren, kann entweder ein größeres Transportmittel ausgewählt werden. Ist diese Möglichkeit nicht vorgesehen, müssen mehrere Transportmittel eingesetzt werden, die unter Berücksichtigung der maximalen Auslastung eingesetzt werden.

7.3 Allokationsmethodik

7.3.1 Transportknoten

Für ein logistischen Knoten können verschiedene Einlagerungs- und Auslagerungsstrategien angewendet werden. Die Allokationsmethode von CO₂e-Werten für ein Lager muss so konzipiert werden, dass die Lagerstrategien nicht die Allokation verfälschen. Eine Zuweisung eines CO₂e-Wertes zu einer logistischen Einheit mit mehreren unterschiedlichen Artikeln ist nicht zulässig. Eine Zuweisung von CO₂e-Werten zu beispielsweise verschiedenen Paletten ist ebenfalls nicht erlaubt. Es gilt ein CO₂e-Gesamtwert für eine bestimmte Stückzahl eines Artikels (SKU_{ID}) im Lager. Dieser Wert ist unabhängig davon, in welcher logistischen Einheit der Artikel sich befindet. Die verwendete Allokationsmethode berücksichtigt drei Anwendungsfälle von Ein- und Auslagerungsstrategien, die in der Praxis angewendet werden: [KKK12, vergl.]

FiFo First-in/First-out

LiFo Last-in/First-out

FeFo First-Expired/First-out

In der Berechnung des CO₂e-Wertes für Lagerprozesse beeinflusst die Lagerzeit den CO₂e Anteil für eine Artikelart (SKU_{ID}) in einem logistischen Knoten. Lagerstrategien verändern die Lagerzeit eines einzelnen Artikels. Das FiFo- und LiFo-Prinzip beziehen sich auf die Einlagerungsreihenfolge von Artikeln. Beim FiFo-Verfahren werden die zuerst eingelagerten Güter als erstes wieder entnommen. Dadurch kann vermieden werden, dass einzelne Artikel unnötig lange gelagert werden. Dagegen werden beim LiFo-Verfahren die zuletzt eingelagerten Güter als erstes wieder entnommen. Das FeFo-Verfahren (First Expired First Out) hat eine besondere Relevanz für Nahrungsmittel, die ein Mindesthaltbarkeitsdatum bzw. Verfallsdatum aufweisen. Artikel, bei denen das Verfallsdatum zeitlich am nächsten zum jetzigen Zeitpunkt liegt, werden vorrangig bei Bedarf ausgelagert. In der Realität befinden die Artikel sich in verschiedenen logistischen Einheiten (z.B. Palette mit Ware) eine unterschiedliche Lagerzeit. Zur Berechnung des Carbon Footprint würde eine Berücksichtigung der Lagerzeit für jedes einzelnes artikelgleiche Produkt (gleiche Artikelnummer) zur

einer Verfälschung des Ergebnisses führen. Würde für jede einzelne Bestandseinheit des gleichen Artikels der exakte CO₂e-Anteil berechnet und gespeichert werden, dann hätte das zur Folge, dass bei der willkürlichen Entnahme der Bestandseinheiten, ein unterschiedlicher CO₂e-Anteil für jeden einzelnen Artikel der gleichen Art vorliegt. Im vorliegenden Ansatz zur Berechnung des Carbon Footprint wird nicht jedem einzelnen Artikel ein exakter CO₂e-Wert zugewiesen, sondern viel mehr ein CO₂e-Durchschnittswert für eine gesamte Artikelart (SKU_{ID}) für jeden Knoten im Distributionssystem berechnet.

Durch die ständige Betrachtung der Gesamtmenge eines Artikels an einem Standort ist es irrelevant wie lange ein einzelner Artikel exakt an einem Standort gelagert worden ist. Die CO₂e-Anteile der Bestandseinheiten der gleichen Artikelart werden zu einem CO₂e-Gesamtwert zusammengefügt, zu dem die Stückzahl der Artikel bekannt ist.

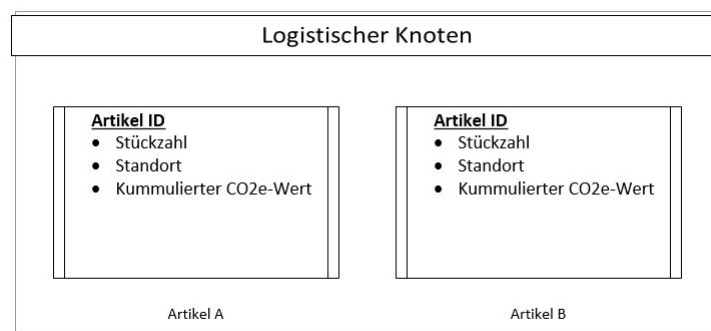


Abb. 7.1: Zuweisung des CO₂e-Wertes für einen Artikel (eigene Darstellung)

Im Lager nimmt der CO₂e-Wert über die Zeit zu. Hierbei wird immer der CO₂e-Wert für den Zeitraum bis zur einer Mengenänderung im Lager berechnet und dann zugeteilt. Danach fängt ein neuer Berechnungszeitraum an, der bei einem CO₂e-Wert bei null für das Lager anfängt.

Die Berechnungsschritte erfolgen immer bei einer Mengenänderung im Lager in der folgenden Reihenfolge:

1. Berechnung des CO₂e-Gesamtwertes für ein Lager
2. Separate Berechnung des CO₂e-Wertes für jede Temperaturzone
3. Allokation des CO₂e-Wertes für die Artikelarten nach Volumen (Lager und Temperaturzone)
4. Bei Entnahme von Artikeln aus dem Lager - Allokation nach Stückzahl
5. Bei Hinzufügen von Artikeln - Addition der artikelspezifischen Stückzahl und dem CO₂e-Wert der Artikelart

Im Folgenden werden die Berechnungsschritte für die fünf Phasen zur Berechnung und Allokation des CO₂e-Wertes angegeben:

1. Berechnung des CO₂e-Gesamtwertes für ein Lager

Der CO₂e-Gesamtwert (COL_m) für einen spezifischen Standort (m) berechnet sich durch Multiplikation vom Basisenergieverbrauch des Lagers (CLB_{la}) mit dem betrachteten Zeitraum, wo keine Mengenänderung stattgefunden hat

$$COL_m = CLB_{la} \cdot t_{la}$$

2. Separate Berechnung des CO₂e-Wertes für jede Temperaturzone

Der separate CO₂e-Gesamtwert $COK_{la,z}$ für eine Temperaturzone wird nur dann berechnet, wenn in der betrachteten Zone eine Mengenänderung vorliegt. Der CO₂e-Wert für die Temperaturzone ergibt sich durch Multiplikation des spezifischen Energieverbrauches der Zone $CLT_{la,z}$ mit dem Zeitraum, wo keine Mengenänderung stattgefunden hat.

$$COK_{la,z} = CLT_{la,z} \cdot t_{la}$$

3. Allokation des CO₂e-Werte für die Artikelarten nach Volumen

Die Allokation des COL_m wird anteilig nach dem Volumen der verschiedenen Artikel (SKU_{ID}) durchgeführt. Der CO₂e-Gesamtwert für eine Artikelart SGS_{ID} berechnet sich durch Multiplikation des CO₂e-Gesamtwert für das Lager mit dem Faktor aus Volumenanteil der Artikel ($VGS_{ID,ORT}$) und dem Gesamtvolumen aller im Lager befindlichen Artikel ($VGC_{ALL,ORT}$)

$$SGS_{ID} = COL_m \cdot \frac{VGS_{ID,ORT}}{VGC_{ALL,ORT}}$$

Die Allokation des $COK_{la,z}$ für die Artikel in den klimatisierten Zonen wird nach der Stückzahl wie folgt durchgeführt. Der $NGC_{ALL,z}$ gibt die Gesamtstückzahl an Artikeln in der Zone an. $NGS_{ID,z}$ ist die Stückzahl einer Artikelart in der Zone.

$$SGS_{ID,z} = COK_{la,z} \cdot \frac{NGS_{ID,z}}{NGC_{ALL,z}}$$

4. Entnahme von Artikeln aus dem Lager

Bei einer Mengenänderung verändert sich die Stückzahl und der CO₂e-Wert entsprechend. Bei der Entnahme eines Artikels aus dem logistischen Knoten, zum Beispiel für den Transport zu einem anderen Standort, wird der CO₂e-Anteil nach der Stückzahl zugewiesen.

Der CO₂e-Wert für eine Bestandseinheit (SKU_{ID}) mit der Stückzahl 1 berechnet sich durch Division der aktuellen Stückzahl im Lager ($NGS_{ID,ORT}$) durch den artikelspezifischen CO₂e-Gesamtwert ($SGS_{ID,ORT}$).

$$SID_{ID} = \frac{SGS_{ID,ORT}}{NGS_{ID,ORT}}$$

Werden aus dem Lager eine bestimmte Anzahl eines Artikels entnommen, so wird der SID_{ID} mit der Anzahl zu entnehmender Artikel multipliziert und dieser Artikel-einheit ein CO₂e-Wert zugewiesen. Zusammengefasst ergibt sich die Formel:

$$SGS_{ID}[OUT] = SGS_{ID} \cdot \frac{N_{ID}[OUT]}{NGS_{ID,ORT}}$$

Bei Entnahme einer bestimmten Menge einer SKU_{ID} wird nach der Stückzahl der ausgelagerten Menge einer SKU_{ID} ein CO_2e -Wert zugewiesen.

5. Einlagern von Artikeln

Wird eine Menge eines Artikels zum Lager hinzugefügt werden die beiden CO_2e -Werte der jeweiligen SKUs des gleichen Typs und die Stückzahl zusammenaddiert.

Addition der CO_2e -Werte von Artikeln der gleichen Art bei zeitgleicher Addition der Stückzahlen:

$$SGS_{ID}[NEU] = SGS_{ID}[ALT] + SGS_{ID}[ADD]$$

Der artikelspezifische SID_{ID} -Wert für einen Standort verändert sich durch Mengenveränderungen. Es ergibt sich daraus ein Durchschnittswert für den CO_2e -Wert eines Artikels, der für jeden Logistikknoten und Transportkante für alle unterschiedlichen Artikel (ID) berechnet und gespeichert wird. Für die Berechnung muss zu jedem Zeitpunkt und für jeden Standort gewährleistet werden, dass der CO_2e -Gesamtwert für die Gesamtstückzahl des jeweiligen Artikels bekannt ist.

7.3.2 Transportkante

Im Gegensatz zur Lagerung ergeben sich beim Transport durch eine Vielzahl von Teilprozessen eine höhere Komplexität der Allokation der CO_2 -Äquivalente für die entlang der Transportkante beförderten Artikel. Speziell zu untersuchen ist der Einfluss einer Mengenänderung während des Transportprozesses. Für das Transportmittel wird wie beim logistischen Knoten ein CO_2e -Gesamtwert für die zu transportierte Stückzahl Artikel einer Art (SKU_{ID}) geführt. Bei einer zielreinen Beladung wird das Transportmittel mit einer Ladung für ein Ziel beladen. Bei der zielgemischten Beladung enthält das Transportmittel Ladungen, die für unterschiedliche Ziele entlang der Fahrtroute liegen. Entlang der Transportstrecke verändert sich durch Be- und Entladungsprozesse die Ladungsmenge. Die zielgemischte Beladung ermöglicht es, den Füllungsgrad des Transportmittels zu erhöhen und Energie einzusparen. [Gud12b, vergl. S.836] Des Weiteren werden Abfertigungsstrategien für ein Transportmittel unterschieden. Dabei werden Fahrten ohne und mit Zuladen unterschieden. Bei Fahrten ohne Zuladen werden nur vollständig geleerte Transportmittel mit einer neuen Ladung beladen. Bei Fahrten mit Zuladen besteht die Möglichkeit an Zwischenstationen die Transporteinheit bei verfügbarem Ladevolumen mit neuer Lademenge zu befüllen. [Gud12b, vergl. S.836] Für die Berechnung und Allokation von CO_2e beim Transport wird im Folgenden beschrieben, wie eine Mengenänderung der Artikel durch Zuladung, Entladung oder Aufspaltung berücksichtigt werden kann.

Transportroutenproblematik

Beim einstufigen Logistiksystem bzw. direkten Güterfluss wird eine Menge an Artikeln mit einem Transportmittel von der Quelle bis zur Senke ohne Unterbrechung, durch beispielsweise Umschlagsprozessen, transportiert. Es werden keine zusätzlichen Lager- und

Bewegungsprozesse zur Überleitung auf andere Transportrouten entlang der Transportkante durchgeführt.[Pfo10, vergl. S.5]

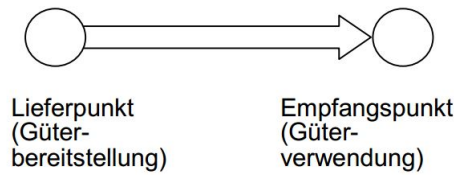


Abb. 7.2: Einstufiges System: Direkter Güterfluss [Pfo10, S.6]

Eine Berechnung des CO₂e-Wert ist für diesen Fall relativ einfach, weil eine definierte bekannte Menge über eine bestimmte Strecke transportiert wird. Zwischen Start- und Zielort erfolgt keine Mengenänderung und das Transportmittel wird nicht gewechselt. Eine Berechnung und Allokation der CO₂e-Werte wird am Zielort vorgenommen. Komplexer ist die Berechnung und Allokation von CO₂e-Werten bei einem **mehrstufigen Logistiksystem**, bei dem zwischen Quelle und Senke der Transport mindestens einmal unterbrochen wird und Lager- und/oder Bewegungsprozesse stattfinden. Eine Unterbrechung des indirekten Güterflusses ist entweder durch Auflösungspunkte, sowie Konzentrationspunkte entlang der Transportkante möglich. Die Aufgabe dieser Zwischenpunkte ist die Auflösung oder Bündelung von Transportmengen. Bei einem Auflösungspunkt wird die Transportmenge in kleinere Teilmengen aufgeteilt, die weiter an unterschiedliche Zielorte transportiert werden. Für diese Aufspaltung der Gütermenge ist es erforderlich, den aktuellen CO₂e-Wert des Transports auf die Teilmengen aufzuteilen. Eine Allokation des kumulierten CO₂e-Wert muss entsprechend den neuen Teilmengen je nach Artikel und Stückzahl adäquat vorgenommen werden.[Pfo10, vergl. S.5]

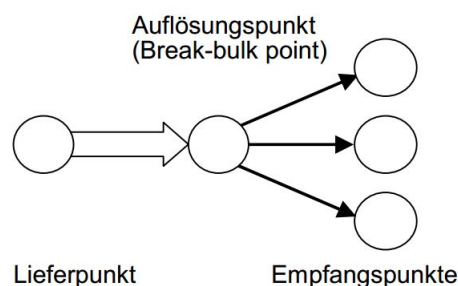


Abb. 7.3: Mehrstufiges System mit Auflösungspunkt [Pfo10, S.6]

Bei einem Auflösungspunkt (engl. Break-Bulk-Point) wird eine Allokation der bis zu diesem Standort entstehenden CO₂e-Anteile zu den Teilmengen und für jede SKU_{ID} durchgeführt. Vom Allokationsverfahren entspricht das Auflösen der Ladung wie einem Entladen einer Artikelmenge aus dem Transportmittel.

Beim Konzentrationspunkt werden kleinere Transportmengen von verschiedenen Lieferpunkten zu einer neuen Transportmenge gebündelt. Hierbei muss beachtet werden, dass sich die Stückzahl eines Artikels verändert und die CO₂e-Teilbeträge zu einem neuen ku-

mulierten CO_2e -Wert zusammengerechnet werden. Für den Konzentrationspunkt werden zwei wesentliche Funktionen unterschieden [Pfo10, vergl. S.7]:

- **Sammeln:** kleinere Mengen eines Gutes von verschiedenen Lieferpunkten wird zu einer größeren homogenen Einheit zusammengefasst
- **Sortimentsbildung:** eingehende homogene Güterflüsse werden zu heterogene ausgehende Güterflüsse zusammengesetzt

Bei einem Konzentrationspunkt werden die CO_2e -Anteile der Teilmengen zu einem neuen CO_2e -Gesamtwert für jede SKU_{ID} zusammenaddiert. Die Allokation ist vergleichbar mit einem Zuladungsprozess, wo eine Artikelmenge dem Transportmittel hinzugefügt wird.

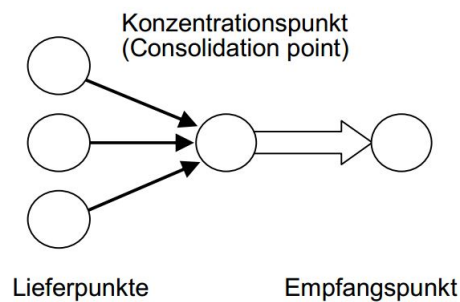


Abb. 7.4: Mehrstufiges System mit Konzentrationspunkt [Pfo10, S.6]

Für die Berechnung und Allokation von CO_2e muss jede Teilmengenveränderung während des Transportes beachtet werden. Ein Gesamttransport kann mit unterschiedlichen Transportmitteln durchgeführt werden. Der Transport mit einem Transportmittel wird als Teilstrecke festgelegt und jede Teilstrecke transportmittelspezifisch für sich separat berechnet. Die Strecke eines Transportmittels lässt sich weiter in Teilstrecken unterteilen, wenn eine Mengenänderung an Zwischenstationen erfolgt. Eine Mengenänderung hat einen Einfluss auf die Allokation, die nach dem Allokationsparameter Gewicht durchgeführt wird. Die Berechnung der Treibhausgasemissionen, die als CO_2e -Werte vorliegen, muss für jede unterbrochene Strecke eines Transportmittels vorgenommen werden. An den Umschlagspunkten entlang der Transportstrecke bzw. Transportkante werden Entlade-, Belade- und Umschlagsprozesse durchgeführt.

Touren- und Rundreisenproblematik

Die Rundreiseproblematik oder auch als *Traveling Salesman Problem* bekannt, beschreibt wie ein Transport von einem gemeinsamen Start- und Zielort zu einer Anzahl von Kunden in bestimmter Reihenfolge durchgeführt wird. Ziel dabei ist es, die Anfahrreihenfolge so zu bestimmen, dass der Fahrtweg der Rundreise minimiert wird. Allgemein ist in der Logistik es eine Aufgabenstellung der Tourenplanung zur Organisation von zum Beispiel Sammel- und Verteilfahrten. Die Minimierung des Fahrtweges ist ein Optimierungsproblem.[KKK12, vergl. S.593]

Die Berechnung der CO_2e -Gesamtwert für einen Transport berechnet sich wie vorher beschrieben aus der Transportdistanz (Entfernungseinheit) und dem spezifischen CO_2e -Wert

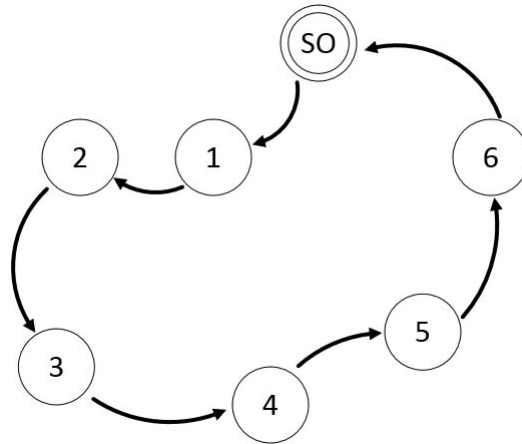


Abb. 7.5: Anfahrreihenfolge bei einer Rundreise (eigene Darstellung)

pro Entfernungseinheit des Transportmittels, der für den beladenen und leeren Zustand vorhanden ist. Für den Transport von Gütern werden zwei Fälle unterschieden, die sich in der Berechnung und Allokationsmethode voneinander unterscheiden. Dabei wird bei einer Mengenänderung während des Transportes an Zwischenstationen, der Einfluss einer Anfahrreihenfolge bei der Rundreise beachtet.

Abhängig davon, wo und wann ein Artikel geladen oder entladen wird, verändert sich die zugewiesene Menge an Kohlendioxid-Äquivalenten. Daher wird für jede Teilstrecke (s_i) eine Berechnung der CO_2e und die Allokation ausgeführt. Dadurch, dass keine exakten Werte für einzelne Artikel berechnet werden, sondern für die jeweilige Gesamtmenge einer Artikelart der CO_2e -Wert zugewiesen wird, ist die Anfahrreihenfolge nicht von allzu großer Bedeutung. Statistisch wird davon ausgegangen, dass sich einzelne Vorteile und Nachteile bei der Zuweisung von CO_2e über die Zeit untereinander ausgleichen und der CO_2e -Durchschnittswert für eine Artikelart eine gute Näherung zum exakten CO_2e -Wert darstellt.

Erfolgt der Transport von Gütern mit zwei oder mehreren Transportmitteln vom Start bis zum Zielort (Kombinierter Verkehr), dann wird jede Teilstrecke eines Transportmittels für sich berechnet. Bestimmend für den Energieverbrauch ist das Transportmittel zur Raumänderung. Beim Huckepackverkehr, wo zum Beispiel Lastkraftwagen per Zug transportiert werden gilt der Verbrauch des Zuges. Der Lastkraftwagen gilt als Ladeinheit.

Berechnungsschritte Transport

Beim Transport ist zu beachten, dass jede Teilstrecke mit einem Transportmittel für sich berechnet wird. Findet während eines Transports mit einem Transportmittel eine Mengenänderung statt, so muss die Berechnungsstruktur verfeinert werden und eine Allokation bei jeder Mengenänderung stattfinden. An Umschlagpunkten kommt es zu Beladungs- und Entladungsprozessen des Transportmittel oder einer Aufspaltung/Zusammenfügen von Transportmengen. Für einen Transport sind alle Artikel und deren Attribute wie zum Beispiel das Gewicht und der kumulierte CO_2e -Wert bekannt. Bei jeder Mengenänderung an einem Umschlagpunkt wird eine Berechnung der CO_2e -Werte für die mit dem Transportmittel zurückgelegte vollzogen. Dabei werden fünf Teilschritte zur Berechnung und Allokation vollzogen:

Die Berechnungsschritte erfolgen immer bei einer Mengenänderung beim Transport in der folgenden Reihenfolge:

1. Berechnung CO₂e für die aktuell zurückgelegte Strecke
2. Separate Berechnung des CO₂e-Wertes für jede Temperaturzone
3. Allokation des CO₂e-Werte für die Artikelarten nach Gewicht (Transporteinheit und Temperaturzone)
4. Bei Entladen von Artikeln: Zuweisung CO₂e-Wert nach Stückzahl
5. Bei Beladen von Artikeln: Addition der Stückzahl und CO₂e-Werte für jeweiligen Artikelgruppen

Im Folgenden werden die Berechnungsschritte für die fünf Phasen zur Berechnung und Allokation des CO₂e-Wertes beim Transport angegeben:

1. Berechnung des CO₂e-Gesamtwertes für den Transport

Der CO₂e-Gesamtwert ($COT_{i,j}$) für einen bestimmte Transportstrecke berechnet sich durch Multiplikation vom Basisenergieverbrauch des Transportmittels (CTB_{ta}) mit der Transportzeit $t_{i,j}$, wo keine Mengenänderung stattgefunden hat. Dazu addiert werden die Energieverbräuche für den beladenen und unbeladenen Zustand und der Energieverbrauch für den Umschlagspunkt. Durch den Energieverbrauch im unbeladenen Zustand wird die Leerfahrt zum Startpunkt zurück mit einbezogen.

$$COT_{i,j} = (CTB_{ta} \cdot t_{i,j}) + (CTV_{ta} \cdot s1_{i,j}) + (CTL_{ta} \cdot s0_{j,i}) + (COU_k)$$

2. Separate Berechnung des CO₂e-Wertes für jede Temperaturzone

Der separate CO₂e-Gesamtwert $COZ_{ta,z}$ für eine Temperaturzone wird nur dann berechnet, wenn in der betrachteten Zone eine Mengenänderung vorliegt. Der CO₂e-Wert für die Temperaturzone ergibt sich durch Multiplikation des spezifischen Energieverbrauches der Zone $CTT_{ta,z}$ mit dem Zeitraum, wo keine Mengenänderung stattgefunden hat.

$$COZ_{ta,z} = CTT_{ta,z} \cdot t_{i,j}$$

3. Allokation des CO₂e-Werte für die Artikelarten nach Gewicht

Die Allokation erfolgt nach Abschluss des Transportes am Zielort nach dem Gewicht der SKU_{ID} -Gruppen im Verhältnis zum Gesamtgewicht aller in der Transporteinheit befindlichen Artikel. Dabei wird für jede SKU_{ID} -Gruppe das Gesamtgewicht benötigt und berechnet:

$$MGS_{ID,ORT} = m0_{ID} \cdot NGS_{ID,ORT}$$

Die Allokation des $COT_{i,j}$ wird anteilig nach dem Gewicht der verschiedenen Artikel (SKU_{ID}) durchgeführt. Der CO₂e-Gesamtwert für eine Artikelart SGS_{ID} berechnet

sich durch Multiplikation des CO₂e-Gesamtwert für den Transport mit dem Faktor aus Artikelgewicht ($MGS_{ID,ORT}$) und dem Gesamtgewicht aller in der Transporteinheit befindlichen Artikel ($MGC_{ALL,ORT}$)

$$SGS_{ID} = COT_{i,j} \cdot \frac{MGS_{ID,ORT}}{MGC_{ALL,ORT}}$$

Die Allokation des $COZ_{ta,z}$ für die Artikel in den klimatisierten Zonen wird nach der Stückzahl wie folgt durchgeführt. Der $NGC_{ALL,z}$ gibt die Gesamtstückzahl an Artikeln in der Zone an. $NGS_{ID,z}$ ist die Stückzahl einer Artikelart in der Zone.

$$SGS_{ID,z} = COZ_{ta,z} \cdot \frac{NGS_{ID,z}}{NGC_{ALL,z}}$$

4. Entladen von Artikeln aus der Transporteinheit

Bei einer Mengenänderung verändert sich die Stückzahl und der CO₂e-Wert entsprechend. Bei der Entnahme eines Artikels aus der Transporteinheit, wird der CO₂e-Anteil nach der Stückzahl zugewiesen.

Der CO₂e-Wert für eine Bestandseinheit (SKU_{ID}) mit der Stückzahl 1 berechnet sich durch Division der aktuellen Stückzahl in der Transporteinheit ($NGS_{ID,ORT}$) durch den artikelspezifischen CO₂e-Gesamtwert ($SGS_{ID,ORT}$).

$$SID_{ID} = \frac{SGS_{ID,ORT}}{NGS_{ID,ORT}}$$

Wird aus der Transporteinheit eine bestimmte Anzahl an Artikeln entnommen, so wird der SID_{ID} mit der Anzahl zu entnehmender Artikel multipliziert und dieser Artikeleinheit ein CO₂e-Wert zugewiesen. Zusammengefasst ergibt sich die Formel:

$$SGS_{ID}[OUT] = SGS_{ID} \cdot \frac{N_{ID}[OUT]}{NGS_{ID,ORT}}$$

Bei Entnahme einer bestimmten Menge einer SKU_{ID} wird nach der Stückzahl der ausgelagerten Menge einer SKU_{ID} ein CO₂e-Wert zugewiesen.

5. Einlagern von Artikeln

Wird eine Menge eines Artikels zum Lager hinzugefügt werden die beiden CO₂e-Werte der jeweiligen SKUs des gleichen Typs und die Stückzahl zusammenaddiert.

Addition der CO₂e-Werte von Artikeln der gleichen Art bei zeitgleicher Addition der Stückzahlen:

$$SGS_{ID}[NEU] = SGS_{ID}[ALT] + SGS_{ID}[ADD]$$

Hierbei wird das Einzelgewicht der Bestandseinheit eines Artikels (ID) mit der Stückzahl multipliziert, die in dem Transportmittel transportiert worden sind. Dieser Berechnungsschritt wird für jede Artikelgruppe (SKU_{ID}) wiederholt. Damit ergibt sich ein Gesamtgewicht für jede Artikelgruppe.

Von Bedeutung ist, dass die Reihenfolge der fünf Teilschritte beibehalten wird. Die Beladung erfolgt immer nach der Entladung von Artikeln innerhalb des Simulationsmodells. Für die Teilstrecke des Transportmittels bis zum nächsten Umschlagspunkt oder Zielort werden jeweils die fünf Teilschritte immer am Ende der Teilstrecke durchgeführt.

Bei der Tourenplanung hat die Ablade- und Aufladereihenfolge Einfluss auf den Carbon Footprint, der beim Transport durch die Zeit- und Wegfunktion bestimmt wird. Wird bei einem Transport vom Start- bis zum Zielort unterwegs Güter abgeladen oder aufgeladen, muss eine Neuberechnung bei jeder Mengenänderung der Transporteinheit erfolgen. Die Anfahrreihenfolge wird zum Beispiel durch festgelegte Lieferzeiten beeinflusst. Güter, die als Erstes bearbeitet werden, haben durch eine geringe Transportzeit und einer geringen Transportstrecke einen geringeren CO₂-Anteil im Vergleich zu Gütern, die erst am Ende der Tour bearbeitet werden.

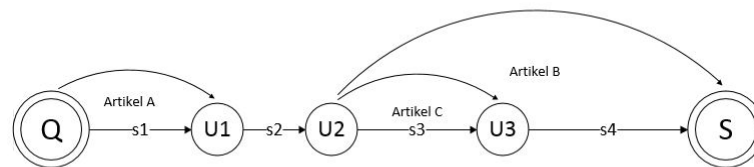


Abb. 7.6: Teilstreckenproblematik (eigene Darstellung)

Für die Berechnung des Carbon Footprint des Transportes ist die Anfahrreihenfolge der einzelnen Stationen von Bedeutung. Das CO₂e für eine Teilstrecke ergibt sich aus der Entfernung und dem spezifischen CO₂e-Wert pro Entfernungseinheit für das Transportmittel. Artikel die als erstes entladen würden, hätten einen geringeren CO₂e-Anteil als Artikel, die erst zum Schluss entladen werden. Bei einer exakten Berechnung des CO₂e-Wertes für jeden einzelnen Artikel, das heißt in diesem Fall haben Artikel der gleichen Art unterschiedliche spezifische CO₂e-Werte, hätte die Anfahrreihenfolge eine große Bedeutung. Hierbei würde der spezifische Artikelwert von der Transportstrecke und der Transportzeit abhängen und variieren.

Im vorliegenden Berechnungsansatz wird ein durchschnittlicher CO₂e-Wert für die Gesamtmenge einer Artikelart zugewiesen. Dadurch ist der Einfluss von Distributionsstrategien nicht so hoch, da sich statistisch die Werte über die Zeit einem spezifischen Mittelwert für einen Artikel und Standort annähern.

Leerfahrtenproblematik

Für die Berechnung und Allokation wird zunächst der beladene Zustand von einem Start- bis zum Zielort betrachtet. Berücksichtigt werden muss die Rückfahrt jedes verwendeten Transportmittels zu dem nächsten Startpunkt im leeren Zustand, wenn keine Ladung an dem Zielort zur Verfügung steht. Die Anzahl der leeren und teilgefüllten Transporteinheiten, die im Transportnetz eines Fahrzeugsystems umlaufen, wird durch Leerfahrtstrategien bestimmt, die den Einsatz der leeren Transporteinheiten regeln. Mögliche Leerfahrtstrategien sind:[Gud12b, S.837]

- **Einzelfahrten:** Jedes Transportmittel bringt die übernommene Ladung zu ihrem Bestimmungsort und kehrt danach auf dem kürzesten Weg leer zur Ausgangsstation zurück, um dort die nächste Ladung zu übernehmen
- Kombinierte Fahrten: Ein geleertes Transportmittel übernimmt am Entladeort eine für die Ausgangsstation bestimmte Rückladung
- **Leerfahrtminimierung:** Ein geleertes Transportmittel übernimmt am Entladeort eine Ladung unabhängig von deren Bestimmungsort, oder fährt, wenn dort keine Ladung ansteht, zur nächstgelegenen Station, in der eine Ladung auf Beförderung wartet
- Fahrplanmäßiges Kapazitätsangebot: Die Fahrzeuge, ob leer oder voll, verkehren unabhängig vom aktuellen Beförderungsbedarf nach einem festen Fahrplan, der an einem prognostizierten Bedarf ausgerichtet ist
- Leerfahrzeugräumung: Wenn bei abnehmendem Beförderungsbedarf an den Entladestationen mehr Transportmittel geleert als an den Versandstationen benötigt werden, fahren die leeren Transportmittel zum nächsten freien Leerfahrzeugpuffer

In der Berechnung des CO₂e-Wertes für eine Transportstrecke wird die Leerfahrtenstrategie **Einzelfahrten** berücksichtigt. Im aktuellen Berechnungsansatz wird davon ausgegangen, dass das Transportmittel vom Zielpunkt zum Startpunkt zurückkehrt. Im Fall der Einzelfahrten wird die Rückfahrt des leeren Transportmittels zur Ausgangsstation in die Berechnung des Carbon Footprint für den erfolgten Transport einbezogen.

Soll der Fall der Leerfahrtenminimierung in das Simulationsmodell umgesetzt werden, dann könnte der CO₂e-Wert für die Leerfahrt nach dem eigentlichen Transport erst bestimmt werden. Erst dann ist bekannt, ob das Transportmittel eine Leerfahrt durchführen muss und wie hoch der zugehörige CO₂e-Anteil der Leerfahrt ist. Eine Allokation des CO₂e-Gesamtwertes der Leerfahrt könnte nachträglich nach der Stückzahl der transportierten Artikel erfolgen. Der Aufwand dafür erscheint hoch, sodass nur der Fall der Einzelfahrten im Berechnungsansatz implementiert wurde.

Transportmittelaufspaltung

Wird ein Transport mit einer bestimmten Ladungsmenge von einem Start- bis zu einem Zielort geplant und besitzt das bereitgestellte Transportmittel keine ausreichende Kapazität bezüglich dem Gewicht oder dem Volumen, um die Ladungsmenge mit einer Fahrt zu transportieren, dann wird ein zusätzliches Transportmittel benötigt. Die Artikel, die mit einem zusätzlichen Transportmittel transportiert werden, haben dann einen schlechteren CO₂e-Anteil durch eine möglicherweise nicht so gute Auslastung des zusätzlichen Transportmittels. Für diesen Fall zu vermeiden, wird die so Allokation angepasst, sodass einzelne Artikel SKU_{ID} nicht benachteiligt werden.

Sollte für eine spezifische Ladungsmenge die Aufspaltung auf zwei oder mehrere Fahrzeuge notwendig sein und der Transport zum gleichen Auftrag mit der identischen Transportroute gehört, dann werden die Einzelverbräuche (CO₂e pro Entfernungseinheit) der eingesetzten Transportmittel und die Ladungsmengen zu einer Grundgesamtheit summiert.

In diesem Fall ist es sinnvoll, die Transportfahrzeuge entsprechend der benötigten Ladekapazität auszuwählen und so eine hohe Auslastung zu erreichen.

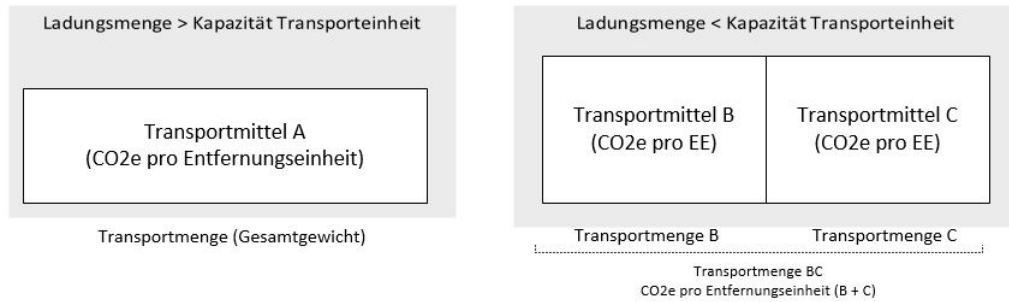


Abb. 7.7: Aufsplittung der Ladungsmenge (eigene Darstellung)

Wie in dem Bild dargestellt, reicht die Ladekapazität nicht für die Lademenge des Auftrags aus. Wenn kein größeres Transportmittel zur Verfügung steht, wird die Ladungsmenge auf zwei Transportmittel aufgesplittet. Die Transportmenge BC ergibt sich durch Addition der Teilmengen von Transportmittel B und C. Wie die Ladungsmenge werden die Einzelverbräuche der Fahrzeuge addiert. Der CO₂e-Wert berechnet sich aus dem Gesamtverbrauch(B+C) pro Entfernungseinheit und die Allokation wird für das Gesamtgewicht der jeweiligen SKU_{ID} durchgeführt.

8 Fazit und Ausblick

Nachfolgend wird die Methode zur Berechnung und zur Allokation von Kohlendioxid-Äquivalenten (CO_{2e}) für Fast Moving Consumer Goods in der Distributionslogistik mit Hilfe der Simulation (DES) zusammenfassend erklärt.

Modellierung

Durch die Bestimmung von Systemgrenzen wurde das zu untersuchende Produktsystem auf die Distributionslogistik eingegrenzt. Von den Prozessen innerhalb der Distributionslogistik wurde die Untersuchung und Berechnung auf die Transport- und Lagerprozesse begrenzt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Stückgüter (FM-CG) als zu befördernde Objekte definiert, die sich durch ihre Artikelvariabilität und spezielle Lager- und Transportanforderungen auszeichnen. Bei der Modellierung des Distributionssystems wurde das Distributionsnetzwerk als Netz von Kanten und Knoten festgelegt. Für die räumliche Veränderung von Gütern wurden Carrier definiert und die zu transportierenden Güter als Objekte festgelegt. Die Objekte werden als Bestandseinheit (SKU_{ID}) definiert und entsprechen mit einer Identifikationsnummer einer Artikelart. Als Transportknoten sind Standorte definiert, wo eine Lagerung von Artikeln zur Zeitüberbrückung stattfindet. Die Transportkanten sind Transportverbindungen, die sich zwischen den Transportknoten aufspannen. Ein Transport erfolgt immer über eine Transportroute von einem Start- zu einem Zielort mit einem oder mehreren Transportmitteln. Für alle Objekte und Elemente im definierten Produkt- bzw. Distributionssystem werden Attribute zugewiesen.

Tab. 8.1: Identifikation THG-Emissionen

Transport	Lagerung
Transportkante	Transportknoten
Carrier	Objekt (SKU _{ID})
Objekt (SKU _{ID})	

Jede Bestandseinheit (SKU), Carrier (Transportmittel), Transportkante (Transportroute) oder Transportknoten (Lager), die im Produktsystem eingesetzt werden, müssen eindeutig identifizierbar und durch Eigenschaften und durch ihre Attribute bestimmt sein.

Berechnung

Die Berechnung des CO_{2e}-Wertes wird für Transportprozesse und Lagerprozesse unterschieden.

Für die Berechnung beim Transport werden die Parameter und Daten für die Transportroute und das Transportmittel benötigt. Für die Transportmittel wird der Basisenergieverbrauch pro Zeiteinheit, der Energieverbrauch für den beladenen Zustand pro Entfernungseinheit und der Energieverbrauch für den leeren Zustand pro Entfernungseinheit des jeweiligen Transportmittels benötigt. Für jedes Transportmittel

wird eine Durchschnittsgeschwindigkeit angegeben, die durch verschiedene Faktoren beeinflusst wird. Die Berechnung des CO₂e-Wertes erfolgt immer für die jeweilige Teilstrecke mit einem Transportmittel bis zu einer Mengenänderung während des Transportes. Nach der Berechnung des CO₂e-Wertes für die Teilstrecke erfolgt immer die Allokation als zweiter Schritt. Für die Allokation werden die Daten der SKU(*ID*) benötigt, die mit dem Transportmittel transportiert werden.

Für die Berechnung bei der Lagerung werden nur die Attribute des jeweiligen Lagers benötigt. Zur Berechnung wird der Basisenergieverbrauch pro Zeiteinheit mit dem Zeitraum multipliziert. Eine Berechnung und Allokation der CO₂e-Anteile erfolgt immer bei jeder Mengenänderung des Bestandsmenge. Nach der Berechnung des CO₂e-Wertes erfolgt immer die Allokation als zweiter Schritt. Für die Allokation werden die Daten der SKU(*ID*) benötigt, die während des betrachteten Zeitraums im Lager sich befinden.

Die Berechnung des CO₂-Wertes für die einzelnen Temperaturzonen im Transportmittel oder Lager erfolgt separat. Hierbei wird der spezifische Energieverbrauch der Zone pro Zeiteinheit mit den jeweiligen Zeitraum bis zur nächsten Mengenänderung multipliziert und danach den Artikeln zugewiesen.

Allokation

Für die Zuteilung der berechneten CO₂e-Werte wurden die Allokationsparameter Stückzahl, Volumen und Gewicht definiert. Bei Transportprozessen erfolgt die Allokation nach dem Gewicht und bei Lagerprozessen nach dem Volumen der Artikel. Für jeden Standort und jede Artikelart (SKU_{*ID*}) wird der kumulierte CO₂e-Wert und die dazugehörige Stückzahl im System gespeichert. Die Allokation erfolgt immer als zweiter Schritt nach der Berechnung der CO₂e-Wert bei jeder Mengenänderung während einem Transport oder in einem logistischen Knoten.

Bei der Allokation nach dem Gewicht wird für jede Artikelart (SKU_{*ID*}) das Gesamtgewicht der jeweiligen SKU_{*ID*} für den jeweiligen Standort berechnet und ins Verhältnis zum Gesamtgewicht aller Artikel gesetzt. Als Ergebnis wird ein Faktor erhalten, der den Anteil der Artikelart am Gesamtgewicht widerspiegelt. Dieser Faktor wird mit dem berechneten CO₂e-Gesamtwert einer Teilstrecke multipliziert. Das Ergebnis daraus ergibt den CO₂e-Anteil für diese Artikelart (SKU_{*ID*}). Dieser Allokationsvorgang wird entsprechend für alle am Transport beteiligten Artikel durchgeführt.

Bei der Allokation nach dem Volumen wird für jede Artikelart (SKU_{*ID*}) das Gesamtvolumen der jeweiligen SKU_{*ID*} für den jeweiligen Standort berechnet und ins Verhältnis zum Gesamtvolumen aller Artikel gesetzt. Als Ergebnis wird ein Faktor erhalten, der den Anteil der Artikelart am Gesamtvolumen widerspiegelt. Dieser Faktor wird mit dem berechneten CO₂e-Gesamtwert eines Lager multipliziert. Das Ergebnis daraus ergibt den CO₂e-Anteil für diese Artikelart (SKU_{*ID*}). Dieser Allokationsvorgang wird entsprechend für alle an der Lagerung beteiligten Artikel durchgeführt.

Für spezielle Temperaturzonen im Transportmittel oder im Lager wird die Allokation des spezifischen CO₂e-Wertes für die jeweilige Zone separat durchgeführt. Je

nach gewünschtem Detailgrad kann die Allokation nach dem Volumen oder nach der Stückzahl für die in dieser Zone gelagerten Artikel ausgeführt werden. Bei der Allokation nach der Stückzahl wird der CO_2 auf die Artikel gleich verteilt. Die Zuteilung nach dem Volumen der Artikel besitzt einen höheren Genauigkeitsgrad, ist aber durch einen höheren Rechenaufwand geprägt. In der Durchführung einer Simulation muss entschieden werden, ob eine Allokation nach der Stückzahl ausreichend genau ist.

Ausblick

Als nächster Teilschritt der Simulationsstudie würde die Umsetzung des Berechnungsansatzes in ein Simulationsmodell und die Durchführung von Simulationen durchlaufen erfolgen. Mit dem Simulationsmodell können verschiedene Szenarien eines Distributionssystems ausprobiert werden und sofern möglich, ein Vergleich von Simulationsergebnissen mit Realwerten vorgenommen werden.

Für die Zukunft ist eine Erweiterung des Simulationsmodells für weitere Phasen des Lebenszyklus eines Produktes denkbar. Des Weiteren besteht die Möglichkeit den Detailgrad des Modells für die Distributionslogistik weiter zu erhöhen. Bestimmte Logistikprozesse wurden vereinfacht in das Simulationsmodell integriert. Es gilt zu überprüfen, inwiefern die Auslastung des Transportmittels bzw. des Lagers in der Berechnung des Carbon Footprint berücksichtigt werden kann. Ein möglicher Ansatz wäre beim Transport das Gesamtgewicht der zu transportierenden Artikel im Verhältnis zu maximalen Nutzlast des Transportmittels zusetzen. Aus dem daraus ergebenden Faktor würde dann der Kehrwert gebildet werden und mit dem Basisenergiewert multipliziert werden. Dadurch würde eine schlechte Auslastung eine Erhöhung des Basisenergieverbrauches zur Folge haben. Für ein Lager würde das Gesamtvolumen der gelagerten Artikel im Verhältnis zum maximalen Lagervolumen gesetzt werden und der Auslastungsgrad analog zum Gewicht in die Berechnung mit einfließen. Diese Erweiterung der Formel wurde noch nicht in die Berechnung integriert, weil eine Unsicherheit dieser Größe (Auslastungsgrad) auf das Simulationsergebnis besteht. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig. Des Weiteren ist eine anteilige Berücksichtigung der verwendeten Ladehilfsmittel im Gewicht und Volumen der jeweiligen Artikel (SKU_{ID}) möglich. Über das Bruttogewicht und Bruttovolumen würde pro SKU ein höherer Volumen- und Gewichtswert angesetzt werden, der das Gewicht und zusätzliche Volumen des Ladehilfsmittels mit anrechnet. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass in diesem Fall für die ganze Durchführung der Simulation für alle Artikel das Bruttogewicht und Bruttovolumen bekannt sein muss und in der Berechnung und der Allokation verwendet wird. Da eine Unsicherheit bei der Umsetzung des Ladehilfsmittels in der Form besteht, sind hierzu Simulationen durchläufe notwendig, die es ermöglichen, Erkenntnisse für die Umsetzung zu sammeln. Zum Zeitpunkt der Arbeit konnte noch keine Simulation durchgeführt werden, so dass hierzu eine weiterführende Untersuchung des Sachverhaltes aussteht. Außerdem gilt es zu untersuchen, ob eine detailliertere Umsetzung des realen Systems in das Simulationsmodell und eine Erweiterung des Berechnungsansatzes notwendig sind. Der berechnete und kumulierte CO_2e -Wert für die jeweiligen SKU_{ID} aus vorherigen

Produktlebensphasen kann als Eingangsgröße übernommen werden, sofern der Wert in dem richtigen Format vorliegt. (SKU_{ID} | CO₂e | Stückzahl)

Eine große Herausforderung ist die Bereitstellung der benötigten Eingangsdaten zur Durchführung der Simulation. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, müssen die Eingangsdaten auf ihre Richtigkeit und Qualität geprüft werden.

Durch den Berechnungsansatz liegt an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt ein durchschnittlicher CO₂e-Wert für jede Artikelart vor. Der CO₂e-Wert kann über die Stückzahl auf jede Menge (z.B. N = 1) für die SKU_{ID} heruntergerechnet werden. Der Berechnungsansatz erzielt nicht einen exakt berechneten CO₂e-Wert für jeden einzelnen Artikel, weil dadurch für Artikel der gleichen Art (ID) unterschiedliche Werte an einem Standort vorliegen und der CO₂e-Wert von zahlreichen Faktoren beeinflusst würde. Außerdem würde in diesem Fall für jede definierte logistische Einheit (Palette, Artikel) ein CO₂e-Wert gespeichert werden. Der Rechenaufwand wäre sehr hoch und das Ergebnis nicht akzeptabel.

Durch die Summierung der Stückzahl von Artikeln der gleichen Art (SKU_{ID}) und die Zuweisung eines artikelspezifischen CO₂e-Gesamtwertes ergibt sich ein CO₂e-Durchschnittswert für jeden Artikel (ID) und jeden Standort, der als Wert bei Verkauf der Artikel auf das Produkt als CO₂e-Label angegeben werden kann.

Literaturverzeichnis

- [And12] Andersson, Skoogh, Johansson: *Evaluation Of Methods Used For Life-Cycle Assessments In Discrete Event Simulation: Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2012 Winter*. http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/local_167292.pdf. Version: 2012
- [BC09] Buchholz, Peter; Clausen, Uwe: *Grosse Netze der Logistik: Die Ergebnisse des Sonderforschungsbereichs 559*. Berlin: Springer, 2009. – ISBN 978–3–540–71047–9
- [BI97] Bloech, Jürgen; Ihde, Gösta-Bernd: *Vahlens grosses Logistiklexikon*. München: Beck and Vahlen, 1997. – ISBN 3800620200
- [BIP07] BIPM; Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft (Hrsg.): *Das internationale Einheitensystem (SI): PTB-Mitteilung*. http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/mitteilungen/2007/PTB-Mitteilungen_2007_Heft_2.pdf. Version: PTB-Mitteilungen 117 (2007), Heft 2, 2007
- [BIP13] BIPM; Bureau International des Poids et Mesures (Hrsg.): *The International System of Units (SI)*. <http://www.bipm.org/en/si/>. Version: 2013
- [BPV12] Becker, Jörg; Probandt, Wolfgang; Vering, Oliver: *Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung: Konzeption und Praxisbeispiel für ein effizientes Prozessmanagement*. Berlin and Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012 (BPM kompetent). – ISBN 3642304117
- [Bun91] Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: *Verordnung über tiefgefrorene Lebensmittel*. <http://www.gesetze-im-internet.de/tlmv/index.html>. Version: 29.10.1991
- [Bun09] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: *Memorandum Product Carbon Footprint: Positionen zur Erfassung und Kommunikation des Product Carbon Footprint für die internationale Standardisierung und Harmonisierung*. http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/memorandum_pcf_lang_bf.pdf. Version: 01.11.2009
- [Chr09] Christian Hochfeld; Öko-Institut e.V (Hrsg.): *Product Carbon Footprinting: Status Quo und Perspektiven in KMU: Pilotprojekt Deutschland*. https://www.tuv.com/media/germany/50_trainingandconsulting/pdf/csr_1/Product_Carbon_Footprint.pdf. Version: 2009
- [Deu12] Deutsche Bahn: *Bahnstrommix*. http://www1.deutschebahn.com/ecm2-db-de/gb_2012/klb/oeko/klimaschutz/erneuerbar.html. Version: 2012

- [Die10] Diestel, Reinhard: *Graphentheorie*. 4. Aufl. Heidelberg [u.a.]: Springer, 2010 (Springer-Lehrbuch Masterclass). – ISBN 3642149111
- [DIN89] DIN; Beuth Verlag GmbH (Hrsg.): *DIN 30781: Transportkette; Grundbegriffe*. <http://cdroms.digibib.net/perinorm/dinnormen/GrundbestandDVD1/2309382/2309382.pdf>? Version: 1989-05-00, 1989
- [DIN06] DIN; Beuth Verlag GmbH (Hrsg.): *Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006*. <http://cdroms.digibib.net/perinorm/dinnormen/GrundbestandDVD3/9715094/9715094.pdf>? Version: Oktober 2006
- [DIN09] DIN; Beuth Verlag GmbH (Hrsg.): *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006*. <http://cdroms.digibib.net/perinorm/dinnormen/GrundbestandDVD4/1555059/1555059.pdf>? Version: November 2009
- [DIN12] DIN; Beuth Verlag GmbH (Hrsg.): *Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für quantitative Bestimmung und Kommunikation (ISO/DIS 14067.2:2012)*. <http://cdroms.digibib.net/perinorm/dinnormen/13update6/1924631/1924631.pdf>? Version: November 2012
- [DIN13a] DIN; Beuth Verlag GmbH (Hrsg.): *Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)*. <http://cdroms.digibib.net/perinorm/dinnormen/13update82/1894795/1894795.pdf>? Version: März 2013
- [DIN13b] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN ISO/IEC 25000: Software-Engineering - Qualitätskriterien und Bewertung von Softwareprodukten (SQuaRE) - Leitfaden für SQuaRE (ISO/IEC 25000:2005)*. <http://cdroms.digibib.net/perinorm/dinnormen/13update82/1990545/1990545.pdf>? Version: 06.05.2013
- [DSL13] DSLV; Deutsche Speditions- und Logistikverband e.V. (Hrsg.): *DSLV-Leitfaden: Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik*. <http://www.spediteure.de/de/binary/1529/1575/page/download.xml>. Version: 2013
- [Ele12] Eley, Michael: *Simulation in der Logistik: Eine Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation"*. Berlin [u.a.]: Springer Gabler, 2012 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 3642273734
- [GMS07] Günther, Hans O.; Mattfeld, Dirk C.; Suhl, Leena: *Management logistischer Netzwerke: Entscheidungsunterstützung, Informationssysteme und OR-Tools*. Heidelberg: Physica-Verlag, 2007. – ISBN 3790819204

- [Gud12a] Gudehus, Timm: *Logistik 1: Grundlagen, Verfahren und Strategien*. Studienausgabe der 4. Auflage. Berlin and Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012 (SpringerLink : Bücher). – ISBN 978-3-642-29359-7
- [Gud12b] Gudehus, Timm: *Logistik 2: Netzwerke, Systeme und Lieferketten*. 4., Aufl. Berlin: Springer Berlin, 2012 (VDI-Buch). – ISBN 3642293751
- [Hah10] Hahne, Erich: *Technische Thermodynamik: Einführung und Anwendung*. 5., völlig überarb. Aufl. München: Oldenbourg, 2010. – ISBN 3486592319
- [HHU11] Heiserich, Otto-Ernst; Helbig, Klaus; Ullmann, Werner: *Logistik: Eine praxisorientierte Einführung*. 4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2011. – ISBN 3834964514
- [Hof07] Hoffmann, Annette: *Unternehmensübergreifendes Kostenmanagement in intermodalen Prozessketten: Theoretische Fundierung und erste empirische Ergebnisse*. Köln: Kölner Wiss.-Verl., 2007. – ISBN 3937404376
- [JS99] Jünemann, Reinhardt; Schmidt, Thorsten: *Materialflußsysteme: Systemtechnische Grundlagen ; mit 36 Tabellen*. 2. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 2000 [erschienen 1999 (Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungen)]. – ISBN 3540650768
- [Kai13] Kai Gutenschwager, Markus Rabe, Mehmet Umut Sari, Till Fechteler; Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference (Hrsg.): *A Data Model For Carbon Footprint Simulation In Consumer Goods Supply Chains*. Wolfenbüttel and Dortmund and Braunschweig, Oktober 2013
- [KG09] Klöpffer, Walter; Grahl, B.: *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. – ISBN 3527320431
- [KKK12] Klaus, Peter; Krieger, Winfried; Krupp, Michael: Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse. In: *Gabler-Lexikon Logistik (2012)*
- [Kla02] Klaus, Peter: *Edition Logistik*. Bd. Bd. 1: *Die dritte Bedeutung der Logistik: Beiträge zur Evolution logistischen Denkens*. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag, 2002. – ISBN 3871542733
- [Klo01] Klose, Andreas: *Standortplanung in distributiven Systemen: Modelle, Methoden, Anwendungen ; mit 14 Tabellen*. Heidelberg: Physica-Verl., 2001 (Betriebswirtschaftliche Studien). – ISBN 3-7908-1410-5
- [Koe12] Koether, Reinhard: *Distributionslogistik: Effiziente Absicherung der Lieferfähigkeit*. Wiesbaden: Gabler, 2012 (Lehrbuch). – ISBN 3834970964
- [Kuh98] Kuhn, Axel: *Simulation in Produktion und Logistik: Fallbeispielsammlung*. Berlin [u.a.]: Springer, 1998. – ISBN 3540638547

- [Lag13] Lagerflaeche: *Serviceplattform für Lagerlogistik*. <http://www.lagerflaeche.de/angebote/kuehllager.html>. Version: 2013
- [Lin11] Lindskog, Lundh, Berglund, Lee, Skoogh, Johansson; S.Jain, R.R. Creasey, J. Himmelspach, K.P. White, and M. Fu, eds. (Hrsg.): *A Method For Determining The Environmental Footprint Of Industrial Products Using Simulation: Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*. http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/150460/local_150460.pdf. Version: 2011
- [Mae11] Maerz, Lothar: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. In: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik* (2011)
- [Maj98] Majumdar, Ramanuj: *Product manangement in India*. 2nd ed. New Delhi: Prentice Hall of India, 1999, c1998. – ISBN 978–81–203–1252–4
- [Pfo96] Pfohl, Hans-Christian: *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. 5., neubearb. und erw. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 1996 (Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungen). – ISBN 978–3–540–60314–6
- [Pfo10] Pfohl, Hans-Christian: *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. 8., neu bearb. u. aktual. Aufl. Berlin and Heidelberg: Springer, 2010. – ISBN 978–3–642–04161–7
- [Pie07] Piers Forster (UK), Venkatachalam Ramaswamy: *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007: Chapter 2 - Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>. Version: 2007
- [pro07] progtrans; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): *Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050*. <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/30886/publicationFile/10534/gueterverkehrs-prognose-2050.pdf>. Version: 2007
- [Pro13] esave Projekt: *e-SAVE project*. <http://www.e-save.eu>. Version: 2013
- [Rab08] Rabe, Markus: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin and Heidelberg: Springer, 2008 (VDI-Buch). – ISBN 3540352813
- [Rab12] Rabe, Deininger; Journal ref: International Journal of Automation Technology, Vol.6, No.3 pp. 296-303, 2012 (Hrsg.): *State of Art and Research Demands for Simulation Modeling of Green Supply Chains*. <https://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=IJATE000600030006.xml>. Version: 2012
- [Rob04] Robinson, Stewart: *Simulation: The practice of model development and use*. Chichester and Eng and Hoboken and N.J.: Wiley, 2004. – ISBN 0470847727

- [Sau99] Sauerbier, Thomas: *Theorie und Praxis von Simulationssystemen: Eine Einführung für Ingenieure und Informatiker ; mit Programmbeispielen und Projekten aus der Technik*. Braunschweig and Wiesbaden: Vieweg, 1999 (Studium Technik). – ISBN 3528038667
- [Sch05] Schulte, Christof: *Logistik: Wege zur Optimierung der supply chain*. 4., überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen, 2005. – ISBN 3800630931
- [Sch10] Scherf, Helmut E.: *Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme: Eine Sammlung von Simulink-Beispielen*. 4., verb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg, 2010. – ISBN 9783486596557
- [Sko08] Skoogh, Johansson: *A Methodology For Input Data Management In Discrete Event Simulation Projects: Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2008 Winter*. http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/79631/local_79631.pdf. Version: 2008
- [Sta13] Statista: *Statistiken zu Fast Moving Consumer Goods (FMCG)*. <http://de.statista.com/themen/574/fmcg/>. Version: 2013
- [Uni98] United Nations: *KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE*. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. Version: 1998
- [Uni13] United Nations Framework Convention on Climate Change; United Nations Framework Convention on Climate Change (Hrsg.): *Kyoto Protocol*. http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php. Version: 2013
- [VDI70] VDI: *VDI 2411: Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen*. 1970
- [VDI10] VDI: *VDI 3633 Blatt 1*. <http://cdroms.digibib.net/perinorm/vdinormen/GrundbestandDVD1/9562313/9562313.pdf>? Version: 2010
- [Wan10] Wannowetsch, Helmut: *Integrierte Materialwirtschaft und Logistik: Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion ; [neu: mit Wiederholungsfragen und Lösungen]*. 4., aktualisierte Aufl. Berlin and Heidelberg: Springer, 2010 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 3540897739
- [Wen08] Wenzel, Sigrid: *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik: Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. Berlin: Springer, 2008 (VDI). – ISBN 3540352767
- [Wid12] Widok, Schiemann, Jahr, Wohlgemuth; S.Jain, R.R. Creasey, J. Himmelspach, K.P. White, and M. Fu, eds. (Hrsg.): *Achieving sustainability through a combination of LCA and DES integrated in a simulation software for production processes: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6465079>. Version: 2012

-
- [WTT87] Wieneke-Toutaoui, Burghilde; Toutaoui, Burghilde W.: *Rechnerunterstütztes Planungssystem zur Auslegung von Fertigungsanlagen*. München: Carl Hanser Verlag, 1987. – ISBN 9783446150003
- [Wüt10] Wütz, Steffen: *Der Product Carbon Footprint: Von Nachhaltigkeit über grüne Logistik zum CO₂-Fußabdruck und der Bewertung in der Praxis*. 1. Aufl. München: GRIN-Verl., 2010. – ISBN 9783640677993

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Beispiel Produktsystem LCA-Ansatz	7
Abb. 2.2:	Treibhausgasemissionen für den kompletten Lebenszyklus	11
Abb. 3.1:	Vertikale Distributionsstruktur	19
Abb. 3.2:	Distributionsstufen	21
Abb. 3.3:	Hauptprozesse Lagerabwicklung	21
Abb. 4.1:	Modal Split im Seehafenverkehr	30
Abb. 4.2:	Grundstrukturen des kombinierten Verkehr	33
Abb. 5.1:	Simulationsarten	38
Abb. 5.2:	Umsetzung eines realen Systems in einem Simulationsmodell	42
Abb. 5.3:	Wege der Systemanalyse	43
Abb. 6.1:	Modellierung für eine Transportverbindung	50
Abb. 6.2:	Gütertransformation durch Logistikprozesse	51
Abb. 7.1:	Zuweisung des CO ₂ e-Wertes für einen Artikel	67
Abb. 7.2:	Einstufiges System: Direkter Güterfluss	70
Abb. 7.3:	Mehrstufiges System mit Auflösungspunkt	70
Abb. 7.4:	Mehrstufiges System mit Konzentrationspunkt	71
Abb. 7.5:	Anfahrreihenfolge bei einer Rundreise	72
Abb. 7.6:	Teilstreckenproblematik	75
Abb. 7.7:	Aufspaltung der Ladungsmenge	77

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Treibhauspotenzial für ausgewählte Treibhausgase	9
Tab. 2.2:	Definition Kohlendioxid-Äquivalent	10
Tab. 2.3:	Phasenmodell zur Erstellung eines Simulationsmodell und Durchführung der CFP-Studie	14
Tab. 3.1:	Distributionspunkte	18
Tab. 4.1:	Emissionsarten	26
Tab. 4.2:	Gewichtsklasseneinteilung für Lastkraftwagen	27
Tab. 4.3:	Anteil Energieträger am Bahnstrommix	29
Tab. 4.4:	Zuggüterklassen	29
Tab. 5.1:	Vergleich von Simulation mit mathematisch-analytischen Methoden . . .	39
Tab. 5.2:	Vergleich von statischen mit dynamischen Methoden	39
Tab. 6.1:	Parameter für eine Transportroute	53
Tab. 6.2:	Parameter für ein Transportmittel einer Transportkante	54
Tab. 6.3:	Parameter für die jeweilige Bestandseinheit	55
Tab. 6.4:	Parameter für einen Transportknoten	56
Tab. 6.5:	Parameter für die jeweilige Bestandseinheit	57
Tab. 7.1:	SI-Einheiten	61
Tab. 7.2:	Definition Kohlendioxid-Äquivalent	62
Tab. 7.3:	Datenwerte für jeden Standort im System	64
Tab. 8.1:	Identifikation THG-Emissionen	78

Abkürzungsverzeichnis

CEN	Comité Européen de Normalisation Europäische Komitee für Normung
CFP	Carbon Footprint CO ₂ -Fußabdruck
CH₄	Methan
CNG	Compressed Natural Gas Erdgas
CO₂e	Kohlendioxidäquivalent
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DES	Discrete event simulation Ereignisdiskrete Simulation
DIN	Deutsches Institut für Normung
ECR	Efficient Consumer Response
ETL	Empty Truck Load
FeFo	First-Expired/First-Out
FiFo	First-In/First-Out
FKW/PFCs	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe
FMCG	Fast Moving Consumer Goods
FTL	Full Truck Load
GS1	Global Standards One
GTIN	Global Trade Item Number
GUI	Graphical User Interface
GWP	global warming potential Treibhauspotenzial
ID	Identifikationsnummer
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change Zwischenstaatlicher Ausschuss über Klimaveränderung
ISO	International Organization for Standardization Internationale Organisation für Normung
KLV	Kombinierter Ladungsverkehr
LCA	Life Cycle Assessment Lebenszyklusanalyse
LiFo	Last-In/First-Out
LKW	Lastkraftwagen
LNG	Liquefied Natural Gas Flüssigerdgas
LPG	Liquefied Petroleum Gas Autogas
LTL	Less Truck Load
MDO	Marine Diesel Oil
MFO	Marine Fuel Oil
MGO	Marine Gasoil
N₂O	Distickstoffoxid
PCF	Product Carbon Footprint
RoLa	Rollende Landstraße
RoRo	Roll-On/Roll-Off

SCM	Supply Chain Management
SF₆	Schwefelhexafluorid
SI	Système international d'unités
SKU	Stock Keeping Unit "Bestandseinheit"
SLCA	Sustainability Life Cycle Assessment
TEHG	Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz
TEU	Twenty Equivalent Unit
THG	Treibhausgas
TLMV	Verordnung über tiefgefrorene Lebensmittel
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VDI	Verein deutscher Ingenieure
sog.	so genannt, -e, -er
z. B.	zum Beispiel

Formelzeichen

b	Breite
h	Höhe
l	Länge
m	Masse
t	Zeit
v	Geschwindigkeit

1. Produktsystem

1.1 Bestandseinheit SKU_{ID}

V_{ID}	Volumen SKU
$m0_{ID}$	Nettogewicht
$m1_{ID}$	Bruttogewicht
T_{ID}	Temperaturanforderung

2. Transportkante

2.1 Transportkante

P_i	Startpunkt
P_j	Zielpunkt
$s_{i,j}$	Transportdistanz
$t_{i,j}$	Transportzeit
$h_{i,j}$	Höhenmeterdifferenz
U_k	Umschlagspunkte
COU_k	Energieverbrauch Umschlagspunkt

2.2 Transportmittel (Carrier)

$TA_{i,j}$	Transportart
V_{TA}	Transportdurchschnittsgeschwindigkeit
CTV_{TA}	Energieverbrauch(voll)
CTL_{TA}	Energieverbrauch(leer)
CTB_{TA}	Energieverbrauch(Basis)
$CTT_{TA,z}$	Energieverbrauch(Temperatur) pro Zone
$s1_{TA}$	Beladendistanz
$s0_{TA}$	Leerfahrtendistanz

3. Transportknoten

LA	Lagerart
CLB_{LA}	Energieverbrauch(Basis)
$CLT_{LA,z}$	Energieverbrauch(Temperatur) je Zone

Eidesstattliche Versicherung

Name, Vorname

Matr.-Nr.

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit/Masterarbeit* mit dem Titel

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum

Unterschrift

*Nichtzutreffendes bitte streichen

Belehrung:

Wer vorsätzlich gegen eine die Täuschung über Prüfungsleistungen betreffende Regelung einer Hochschulprüfungsordnung verstößt, handelt ordnungswidrig. Die Ordnungswidrigkeit kann mit einer Geldbuße von bis zu 50.000,00 € geahndet werden. Zuständige Verwaltungsbehörde für die Verfolgung und Ahndung von Ordnungswidrigkeiten ist der Kanzler/die Kanzlerin der Technischen Universität Dortmund. Im Falle eines mehrfachen oder sonstigen schwerwiegenden Täuschungsversuches kann der Prüfling zudem exmatrikuliert werden. (§ 63 Abs. 5 Hochschulgesetz - HG -)

Die Abgabe einer falschen Versicherung an Eides statt wird mit Freiheitsstrafe bis zu 3 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Die Technische Universität Dortmund wird gfls. elektronische Vergleichswerkzeuge (wie z.B. die Software „turnitin“) zur Überprüfung von Ordnungswidrigkeiten in Prüfungsverfahren nutzen.

Die oben stehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Ort, Datum

Unterschrift