



Hochschule Neu-Ulm  
University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

im Bachelorstudiengang

**Information Management Automotive**

an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Neu-Ulm

**Optimierung des Carbon Footprint in der Transportlogistik**

Erstkorrektor: Prof. Dr. Jürgen Grinninger

Zweitkorrektor: Prof. Dr. Jörg-Oliver Vogt

Verfasser: Marco Wesinger (Matrikel-Nr.: 272848)

Thema erhalten: 04.02.2023

Arbeit abgegeben: 02.06.2023

**LOSE BEILAGEN**

Anhang, Plagiarism Scan

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
Gender-Hinweis.....	VI
1 Handlungsbedarf durch den Klimawandel.....	1
2 Grundlagen der Transportlogistik.....	4
2.1 Green Logistics.....	4
2.2 Güterverkehrsträger.....	5
2.2.1 Straßengüterverkehr.....	7
2.2.2 Schienengüterverkehr.....	9
2.2.3 Binnenschiffgüterverkehr.....	10
2.2.4 Seeschiffgüterverkehr.....	11
2.2.5 Luftfrachtverkehr.....	13
3 Der Carbon Footprint in der Transportlogistik.....	15
3.1 Der Carbon Footprint.....	15
3.2 Kategorisierung der Treibhausgasemissionen.....	16
3.3 Ermittlung des Carbon Footprint von Transportdienstleistungen.....	18
3.3.1 Vorgehen zur Berechnung der Treibhausgasemissionen nach DIN EN 16258.....	20
3.3.2 Berechnung der Treibhausgasemissionen nach DIN EN 16258.....	22
3.3.3 Sonderfälle bei der Allokation.....	25
3.4 Einflussfaktoren auf den Carbon Footprint in der Transportlogistik.....	26
4 Strategien zur Minimierung des Carbon Footprint in der Transportlogistik.....	28
4.1 Wahl des Güterverkehrsträgers.....	28
4.2 Effiziente Transportkoordination.....	29
4.3 Routenwahl.....	31
4.4 Nutzung von modernen Transportmitteln.....	31
4.5 Ladungsgewichtsreduzierung.....	32
5 Optimierung des Carbon Footprint in der Transportlogistik am Beispiel der Drohnenproduktion an der Hochschule Neu-Ulm.....	33
5.1 Beispiel Drohnenproduktion an der Hochschule Neu-Ulm.....	34
5.2 Gewicht der einzelnen Komponenten.....	35
5.3 Ermittlung des Carbon Footprint der Transporte für eine Drohne.....	37
5.4 Optimierung des Carbon Footprint.....	39
5.4.1 Nutzung alternativer Verkehrsträger.....	39

5.4.2	Aufbau eines Transportnetzwerkes.....	42
5.4.3	Nutzung moderner Verkehrsträger .....	43
5.4.5	Gewichtsreduzierung .....	44
6	Diskussion.....	46
7	Fazit .....	48
	Literaturverzeichnis.....	VII
	Eidesstattliche Erklärung .....	X

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Anteile der verschiedenen Verkehrsträger an der Beförderungsmenge .....	5
Abbildung 2: Emissionen der Verkehrsmittel .....	28

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zuordnung umweltrelevanter Bereiche zu Scope 1 bis 3.....	17
Tabelle 2: Faktoren für die Treibhausgasemissionsberechnung berechnet als CO <sub>2</sub> -Äquivalente nach EN 16258 .....	23
Tabelle 3: Benötigte Komponenten für Drohnenbau .....	34
Tabelle 4: Gewicht der Komponenten.....	35
Tabelle 5: Ursprünglicher Carbon Footprint der Komponenten (als CO <sub>2</sub> -Äquivalent in Tonnen).....	38
Tabelle 6: Carbon Footprint der Komponenten (als CO <sub>2</sub> -Äquivalent in Tonnen) bei Nutzung alternativer Verkehrsträger .....	40

## Abkürzungsverzeichnis

BRD .....	<i>Bundesrepublik Deutschland</i>
CO <sub>2</sub> .....	<i>Kohlenstoffdioxid</i>
DIN .....	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EN .....	<i>Europäische Norm</i>
EU .....	<i>Europäische Union</i>
GHG .....	<i>Greenhouse Gas</i>
Ro/Ro .....	<i>Roll on/Roll off</i>
TEU .....	<i>Twenty-Foot Equivalent Unit</i>
VOS .....	<i>Vehicles Operations System, Vehicles Operations System</i>
WTW .....	<i>Well-to-Wheel</i>

## **Gender-Hinweis**

Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Hausarbeit das generische Maskulinum verwendet. Die in dieser Arbeit verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich – sofern nicht anders kenntlich gemacht – auf alle Geschlechter.

# 1 Handlungsbedarf durch den Klimawandel

In den vergangenen Jahrzehnten hat der Umweltschutz kontinuierlich an Bedeutung gewonnen. Die Wissenschaft weist deutlich darauf hin, dass ein Umdenken in allen Handlungsbereichen notwendig ist, um die Erde und dessen Klima für zukünftige Generation weiterhin als lebenswerten Ort zu hinterlassen<sup>1</sup>.

Der menschengemachte Klimawandel ist wissenschaftlich erwiesen. Seit der Industrialisierung steigt die globale Temperatur an. Der Grund dafür ist, dass die Menschen den natürlichen Treibhauseffekt verstärken. Die Konzentration von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in der Atmosphäre nimmt seit der Mitte des 19. Jahrhunderts stark zu. Im Vergleich zu Werten vor der Zeit der Industrialisierung ist sie um 45 Prozent gestiegen. Die Folgen des Klimawandels sind folgenreich. Der Temperaturanstieg führt zum Abschmelzen der Polarkappen, wodurch es global zum Anstieg des Meeresspiegels kommt. Seit 2006 steigt der Meeresspiegel jährlich um 3,6 Millimeter.<sup>2</sup>

Die Befürchtungen und Prognosen der Wissenschaft haben auch in der Politik für ein Umdenken gesorgt. Das sogenannte *Kyoto Protokoll* gilt als Pionierleistung in der internationalen Klimaschutzpolitik. Auf der Klimakonferenz in Japan im Jahr 1997 einigten sich 84 Länder darauf, langfristig die Treibhausgasemissionen zu reduzieren.<sup>3</sup>

Auch das sogenannte *Klimaabkommen von Paris* gilt als Meilenstein in der internationalen Klimapolitik. Am 12. Dezember 2015 verpflichteten sich auf der Weltklimakonferenz in Paris 195 Staaten dazu, für eine Eindämmung des Klimawandels zu sorgen und eine klimafreundliche Weltwirtschaft zu gestalten. Es wurde das Ziel definiert, den weltweiten Temperaturanstieg auf 1,5 Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen.<sup>4</sup>

Im Jahr 2021 wurden mit dem neuen und verschärften Klimaschutzgesetz neue Klimaziele gesetzt, die bis 2045 eine Treibhausgasneutralität der BRD vorsehen. Zum Zeitpunkt der Verabschiedung des neuen Klimaschutzgesetzes lag die Reduktion von Treibhausgasen gegenüber 1990 bei 40,8%. Als nächste Etappe bei der Erreichung

---

<sup>1</sup> Vgl. Brasseur et al., 2016, S.2.

<sup>2</sup> Vgl. Rüger & Buchheim, 2021, S.7

<sup>3</sup> Vgl. Tineke, 2002, S. 1.

<sup>4</sup> Vgl. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, 2015.

des Klimaziels soll bis 2030 eine Reduktion von 65% erreicht werden, bis 2040 von 88% (gegenüber 1990). Bis 2045 will Deutschland Treibhausgasneutralität erreichen und nach 2050 soll ein Streben nach negativen Emissionen folgen. Das bedeutet, dass weniger Treibhausgase freigesetzt werden als in natürlichen Senken aufgenommen werden.<sup>5</sup>

Um die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor von 164 Millionen Tonnen (1990) auf etwas weniger als die Hälfte von 85 Millionen Tonnen bis zum Jahr 2030 zu reduzieren, gibt es bereits Pläne der BRD. Neben der Elektrifizierung von Privatfahrzeugen durch Anreize - wie beispielsweise Kaufprämien - und einem umfangreichen Ausbau der Ladeinfrastruktur, sollen auch im Güterverkehr neue Strategien verfolgt werden. Der Großteil von Transporten soll von der Straße auf das Wasser und die Schiene verlagert werden und auf lange Frist sollen synthetische Kraftstoffe die fossilen Kraftstoffe ablösen.<sup>6</sup>

Der Klimawandel ist ein Problem, das die Gesellschaft, Industrie und Politik immer mehr belastet. Industrieprozesse sind für einen Anteil von 7,5% an den Gesamtemissionen in Deutschland verantwortlich.<sup>7</sup> Durch gesetzliche Regularien sowie gesellschaftlichen Druck sehen sich immer mehr Unternehmen gezwungen, ihre gesamte Wertschöpfungskette nachhaltiger zu gestalten und den eigenen Carbon Footprint zu minimieren.

Im Zuge der Globalisierung stieg das Transportaufkommen bis heute an und Transportwege wurden größer.<sup>8</sup> Da Transportdienstleistungen meist CO<sub>2</sub>-Emissionen mit sich bringen, ist es in der heutigen Zeit wichtig, auch den Aspekt des Carbon Footprint in die Planung der Transportlogistik miteinzubeziehen. Diese Arbeit verfolgt das Ziel, Strategien zur Minimierung des Carbon Footprint in der Transportlogistik auszuarbeiten.

Dabei wird zunächst im ersten Kapitel auf die relevanten Grundlagen der Transportlogistik eingegangen. Hierbei wird zuerst die Definition und die Notwendigkeit von „Green Logistics“ aufgezeigt. Im Anschluss werden die verschiedenen

---

<sup>5</sup> Vgl. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2022.

<sup>6</sup> Vgl. Schiffer, 2021, S. 638.

<sup>7</sup> Vgl. Wilke, 2023.

<sup>8</sup> Vgl. Statistisches Bundesamt, 2023.

Güterverkehrsträger beschrieben sowie deren für diese Arbeit relevanten Vor- und Nachteile dargelegt.

Anschließend wird im zweiten Kapitel der Carbon Footprint definiert und die verschiedenen Kategorien von Treibhausgasemissionen erläutert. Ferner wird die Ermittlung der Treibhausgasemissionen von Transportdienstleistungen anhand der DIN EN 16258 dargestellt und schrittweise beschrieben. Die genaue Betrachtung der DIN EN 16258 ermöglicht schließlich die Ermittlung von Einflussfaktoren auf den Carbon Footprint.

Nachdem diese Einflussfaktoren ermittelt wurden, können im dritten Kapitel Strategien entwickelt werden, die eine Minimierung des Carbon Footprint zur Folge haben könnten.

Zur Überprüfung dieser Optimierungsstrategien wird abschließend in Kapitel vier in Form eines Experiments die Optimierung des Carbon Footprint in der Transportlogistik an einem konkreten Beispiel demonstriert. Dabei wird die Produktion von Drohnen an der Hochschule Neu-Ulm betrachtet. Nachdem der Carbon Footprint der Transporte für die Komponenten einer Drohne ermittelt wird, werden anhand dieses Beispiels die verschiedenen Strategien zur Emissionsreduzierung diskutiert und deren Effektivität bewertet.

## 2 Grundlagen der Transportlogistik

### 2.1 Green Logistics

Nachhaltiges Supply Chain Management hat über die letzten Jahrzehnte in allen Industriezweigen stark an Relevanz zugenommen. Der Transportsektor ist in Folge der Globalisierung sehr stark gewachsen und trägt somit in großem Ausmaß zum Klimawandel bei. Der Gütertransport ist in der Europäischen Union von dem Jahr 2000 bis 2019 um über 23% gestiegen.<sup>9</sup> Laut Studien des „World Economics Forums“ liegt der Anteil des Transportsektors im Jahr 2022 an den gesamten weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei mindestens 5,5% mit steigender Tendenz.<sup>10</sup>

Um die Klimaziele zu erreichen und eine Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen zu bewirken, bedarf es gut durchdachter Lieferketten. Das bedeutet, dass umweltbezogene Aspekte in betriebswirtschaftliche Entscheidungen integriert werden müssen.<sup>11</sup> Steigende Lieferkosten sind dementsprechend nicht selten eine Folge von umweltbewusst gestalteten Supply Chains.

Green Logistics gehört zum Bereich Umweltmanagement. Es handelt sich um einen Prozess, um Emissionen und den Verbrauch von Ressourcen bei Logistik- und Transportprozessen innerhalb eines Unternehmens sowie zwischen Unternehmen zu erfassen und zu reduzieren. Dieser Prozess kann durchgehend optimiert werden, wodurch eine ständige Verbesserung der Nachhaltigkeit in der Logistik erreicht werden kann.<sup>12</sup>

---

<sup>9</sup> Vgl. Europäische Union, 2021, S. 36.

<sup>10</sup> Vgl. Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, 2022.

<sup>11</sup> Vgl. Wittenbrink, 2015, S. 1.

<sup>12</sup> Vgl. Sarkis & Dou, 2017, S. 71 ff.

## 2.2 Güterverkehrsträger

Güterverkehrsträger dienen dem Gütertransport von der Produktionsstätte zum Ort des Ver- oder Gebrauchs. Dafür werden durch die unterschiedlichen Transportsysteme die verschiedensten Verkehrsträger verwendet.

Dabei ist zu unterscheiden, ob die Transporte auf dem Landweg, dem Luftweg oder dem Wasserweg getätigt werden. Bei den verschiedenen Verkehrswegen gibt es unterschiedliche Verkehrsträger, welche in den folgenden Kapiteln genauer analysiert werden. Oft werden in der Transportlogistik auch kombinierte Verkehrswege genutzt.

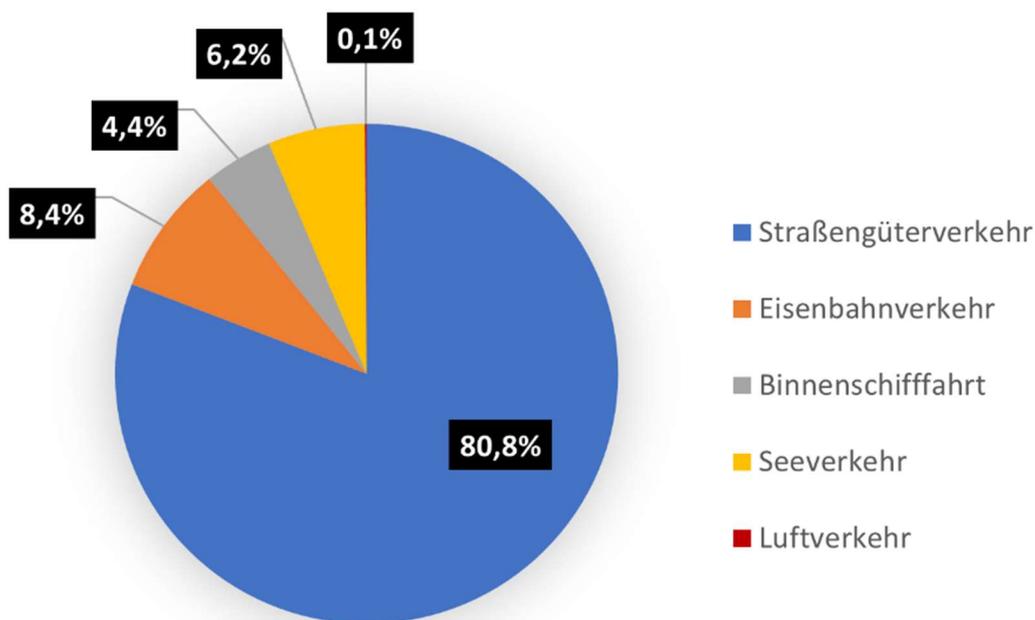


Abbildung 1: Anteile der verschiedenen Verkehrsträger an der Beförderungsmenge (2019)  
Quelle: In Anlehnung an statistisches Bundesamt, 2022. S.1.

Abbildung 1 zeigt die Anteile der verschiedenen Verkehrsträger auf die Beförderungsmenge bezogen, im Jahr 2019. Die hierfür genutzten Daten stammen vom statistischen Bundesamt. Dabei ist zu beachten, dass der Verkehrsträger Rohöleleitungen außer Acht gelassen wurde, da er für diese Arbeit irrelevant ist.

Den deutlich größten Anteil an der Beförderungsmenge des Güterverkehrs hatte im Jahr 2019 der Straßenverkehr. Durch diesen wurden laut dem statistischen Bundesamt knapp 3,7 Milliarden Tonnen an Gütern durch deutsche und ausländische Lastkraftwagen transportiert. An zweiter Stelle (in Deutschland) steht der Eisenbahnverkehr mit etwas mehr als 390 Millionen Tonnen transportierter Beförderungsmenge. Durch die Binnenschifffahrt wurden 205 Millionen und durch den

Seeverkehr 290 Millionen Tonnen Güter befördert. Da im Luftverkehr meist nur besonders hochwertige oder dringliche Lieferungen getätigt werden, ist der Anteil an der Beförderungsmenge sehr gering. Es wurden 2019 etwas mehr als 4,7 Millionen Tonnen durch den Luftverkehr befördert.<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup> Vgl. statistisches Bundesamt, 2022, S.1.

### 2.2.1 Straßengüterverkehr

Der Straßengüterverkehr umschließt alle Gütertransporte, die mit Kraftfahrzeugen auf der Straße erfolgen. Er nutzt das öffentliche Straßennetz, das in Deutschland aus ca. 830.000 Kilometern Straße besteht.<sup>14</sup> Es gibt laut der DIN 70010 viele verschiedene Straßenverkehrsmittel unterschiedlicher Bauart, die für den Transport auf der Straße verwendet werden. Es werden zum Beispiel Lastkraftwagen, Lastkraftwagenzüge, d.h. Lastkraftwagen mit einem Deichselanhänger, oder Personenkraftwagen-Kombinationen eingesetzt.<sup>15</sup>

Die Abbildung 1 zeigt, dass der Straßengüterverkehr mit einem großen Vorsprung in Deutschland aus verschiedenen Gründen der meistgenutzte Güterverkehrsträger ist. Zum einen ermöglicht das dichte Straßennetz Transporte zu jedem besiedelten Ort. Zum anderen ist der Straßengüterverkehr sowohl für kurze als auch für längere Strecken geeignet und ermöglicht als einziger Güterverkehrsträger nahezu immer einen direkten Transport vom Versender zum Empfänger. Hinzu kommt, dass der Straßengüterverkehr durch eine hohe Flexibilität und Zuverlässigkeit gekennzeichnet ist. Kurzfristige Routenänderungen oder Bestellungen können ohne besonders aufwendige vorherige Planung vorgenommen werden.<sup>16</sup>

Dem Umweltbundesamt zufolge gibt es zwei Trends in der Wirtschaft, die den Straßengüterverkehr begünstigen. Es gibt einen sogenannten „Güterstruktureffekt“, der den Anteil an kleinen und hochwertigen Gütern, wie zum Beispiel Elektronikgeräte, wachsen lässt. Diese Art von Gütern wird meist mit dem LKW oder dem Flugzeug transportiert.

Der zweite Entwicklungstrend nennt sich „Logistikeffekt“. Bei diesem werden Logistikdienstleistungen tief in die Prozesse der Produktion miteingebunden, wie beispielsweise bei der „Just-in-time“-Produktion. Aufgrund der hierfür erforderlichen hohen Flexibilität und Zuverlässigkeit bietet sich der Straßengüterverkehr gut an.<sup>17</sup>

Die Just-in-time-Produktion ist beispielsweise in der Automobilindustrie eine bewährte Produktionsweise. Da die gelieferten Teile oft ein hohes Gewicht und Volumen aufbringen und Lagerplätze in der eigenen Produktion mit Kosten verbunden sind, ist

---

<sup>14</sup> Vgl. Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2022.

<sup>15</sup> Vgl. DIN 70010, 2001.

<sup>16</sup> Vgl. Clausen & Geiger, 2013, S. 139.

<sup>17</sup> Vgl. Umweltbundesamt, 2019.

es von Vorteil, wenn die Teile erst geliefert werden, wenn sie im Produktionsprozess benötigt werden. So können Platz und damit verbundene Kosten gespart werden.

Im Nahverkehr gilt der Straßengüterverkehr als konkurrenzlos. Selbst bei Transporten mit der Eisenbahn, dem Flugzeug oder dem Schiff muss oft auf dem ersten und letzten Streckenabschnitt auf den Straßengüterverkehr umgestiegen werden, denn die Knotenpunkte der anderen Verkehrsträger, wie Bahnhöfe, Häfen und Flughäfen sind nur sehr selten in direkter Nähe des Absenders und des Empfängers.<sup>18</sup>

Der Straßengüterverkehr bringt aber auch Nachteile mit sich. Für die Forschungsfrage dieser Arbeit ist besonders folgender Nachteil von Bedeutung. Da die meisten LKW mit einem Diesel-Motor angetrieben werden, sind bei einem Lastkraftwagen die direkten Emissionen pro Tonnenkilometer deutlich höher als bei dem Binnenschiff und der Güterbahn. Das deutsche Umweltbundesamt geht im Jahr 2020 bei einem LKW-Transport durchschnittlich von Treibhausgasemissionen von 111 Gramm pro Tonnenkilometer aus.<sup>19</sup>

---

<sup>18</sup> Vgl. Clausen & Geiger, S. 287, 2013.

<sup>19</sup> Vgl. Umweltbundesamt, 2022.

## 2.2.2 Schienengüterverkehr

Eine weitere Transportmöglichkeit über den Landweg ermöglicht der Schienengüterverkehr, auch Eisenbahngüterverkehr genannt. Hier werden die Waren durch Güterzüge und Güterwagen auf Schienen transportiert. Bei Güterzügen gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Arten von Lokomotiven bzw. Zugmaschinen: Elektrische Lokomotiven und Diesellokomotiven.

Elektrische Lokomotiven gelten als die umweltfreundlichere Variante - auch wenn der Strom nicht vollständig aus regenerativen Energiequellen bezogen wird - und sie bieten eine deutlich größere Zugkraft als dieselbetriebene Lokomotiven.<sup>20</sup>

Allerdings haben sie den Nachteil, dass sie elektrifizierte Bahntrassen benötigen. Die dazu notwendigen Oberleitungen behindern eine schnelle und einfache vertikale Be- und Entladung. Darüber hinaus sind sie mit nicht geringen Kosten für Bau- und Wartungsarbeiten verbunden. Wegen der hohen Betriebskosten von Oberleitungen für elektrisch betriebene Lokomotiven lohnt sich der Betrieb sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht nur, wenn eine hohe Auslastung der Strecke erreicht wird bzw. ein hohes Sendungsaufkommen vorhanden ist.

Deshalb werden für wenig befahrene Bahnstrecken, die meist nicht elektrifiziert sind, Diesellokomotiven genutzt. Bei den dieselbetriebenen Lokomotiven gibt es zwei verschiedene Arten des Antriebs: der dieselektrische Antrieb, bei dem ein dieselbetriebener Generator Strom für den Antrieb erzeugt und der dieselhydraulische Antrieb, bei dem die Kraft des Dieselmotors durch ein Getriebe oder einen Drehmomentwandler übertragen wird. Ersteres ist weltweit die verbreitetste Antriebsart von Diesellokomotiven und zweiteres die in Deutschland am meisten genutzte Antriebsart bei Diesellokomotiven.<sup>21</sup>

---

<sup>20</sup> Vgl. Berndt, 2001, S. 136.

<sup>21</sup> Vgl. Clausen & Geiger, 2013, S. 165.

### 2.2.3 Binnenschiffgüterverkehr

Der Binnenschiffgüterverkehr findet auf Binnenschiffahrtstraßen statt. Meist werden Binnenschiffe für die Beförderung von Massengut verwendet. Ein Großteil der durch Binnenschiffe beförderten Menge besteht beispielweise aus Mineralien, Steinen, Mineralölerzeugnissen und Gasen. Das Binnenwasserstraßennetz ist deutlich kleiner als das Straßen- und Schienennetz, hat in Deutschland aber ein vielfach höheres Verkehrsaufkommen in Tonnen je Kilometer.

Binnenwasserstraßen sind künstlich angelegte oder natürliche inländische Gewässer wie Seen, Kanäle und Flüsse. Die deutschen Binnenwasserstraßen haben eine Gesamtlänge von 7.476 Kilometer<sup>22</sup>, welche in sieben Kategorien unterteilt sind. Diese Klassifizierungen geben die maximalen Abmessungen bezüglich Länge, Breite und Tiefgang des Schiffes oder der Schub- bzw. Schleppverbände vor und setzen sich außerdem noch aus der Tonnage und der Brückendurchfahrtshöhe zusammen.

Binnenschiffe werden mit Dieselmotoren betrieben. Trotzdem gelten sie als umweltfreundliches Güterverkehrsmittel, da sie im Güterverkehr den niedrigsten Primärenergiebedarf haben. Dieser beläuft sich auf durchschnittlich 100 Tonnenkilometer pro Liter Diesel.<sup>23</sup>

Es gibt unterschiedliche Arten von Binnenschiffen. Nicht nur Massengutfrachter, sondern auch Containerschiffe und Tanker sind vermehrt auf den Binnenschiffwasserstraßen vertreten. Außerdem wird oft durch Schubverbände transportiert, Schleppverbände kommen heutzutage eher selten zum Einsatz. Schubverbände bestehen aus einem Schubschiff, welches die sog. Schubleichter, auf denen sich die Güter befinden, anschiebt.

Binnenschiffe und Verbände unterscheiden sich stark in ihrer Tragfähigkeit, die von hundert bis mehrere tausend Tonnen reicht. Neben dem Massengutverkehr in der Gelegenheitsschiffahrt, gibt es noch die Linienschiffahrt. Hierbei werden mehrere Ladungen von verschiedenen Versendern in Containern transportiert. Die hierfür verwendeten Binnenschiffe können zwischen 200 und 500 TEU befördern.<sup>24</sup>

---

<sup>22</sup> Vgl. Deutscher Wasserstraßen- und Schifffahrtsverein Rhein-Main-Donau e.V., 2023.

<sup>23</sup> Vgl. Clausen & Geiger, 2013, S. 180 f.

<sup>24</sup> Vgl. Large, 2012, S. 61.

## 2.2.4 Seeschiffgüterverkehr

Der Seegüterverkehr gilt als zentrales Güterverkehrsmittel für weltweite Transporte und den interkontinentalen Handel. Der Seeschiffahrt stehen alle Meere zur Verfügung, um Transporte durchzuführen. Das Wegenetz besteht im Wesentlichen hauptsächlich aus den Seehäfen und einigen Kanälen, welche die Meere verbinden, wie beispielsweise der Suez-Kanal oder der deutsche Nord-Ostsee-Kanal. Als im Vergleich günstiges und zuverlässiges Transportmittel, ist der Seeschiffgüterverkehr unverzichtbar für den Welthandel.

Seeschiffe gibt es in vielen verschiedenen Ausführungen und Größen, welche vom Einsatzgebiet und der Fracht abhängen. Grundsätzlich gibt es die vier verschiedenen Schiffstypen

- Massengutfrachter
- Containerschiffe
- Stückgutfrachter
- Ro/Ro-Schiffe

im Seegüterverkehr, die sich nach Funktion und Transportgut weiter unterteilen lassen. Es wird außerdem zwischen Hochseeschiffen und Küstenschiffen unterschieden, wobei Küstenschiffe kleiner sind, und für kürzere Distanzen verwendet werden.<sup>25</sup>

Tanker und Trockengutfrachter gehören zur Kategorie der Massengutfrachter, auch „Bulk Carrier“ genannt. Sie befördern beispielsweise Rohöl, Chemikalien, Flüssigerdgas sowie trockene Rohstoffe, wie Eisenerz, Kohle oder Zement.

Vollcontainerschiffe werden lediglich für den Transport von ISO-Containern verwendet. Da sie in der Regel nicht über ein eigenes Ladegeschirr verfügen, besteht für die Be- und Entladung eine Angewiesenheit zu den Containerbrücken der Containerhäfen.

Stückgutfrachter werden für die Beförderung von Waren verwendet, welche nicht standardisierte Maße vorweisen, wodurch ein Transport in ISO-Containern nicht möglich ist. Um den besonderen Anforderungen der Stückgutfracht zu entsprechen,

---

<sup>25</sup> Vgl. Large, 2012, S. 62.

ermöglichen verstellbare Zwischendecks eine Anpassung des Laderaums. Werden zusätzliche Containerstellplätze auf den Decks bereitgestellt, wird von Mehrzweckfrachtern gesprochen.

Ro/Ro-Schiffe (Roll On/Roll Off - Schiffe), auch Autotransporter genannt, befördern rollende oder rollbar gemachte Ladungen. Autotransporter, welche neben Autos auch LKW, Sonderfahrzeuge und Landmaschinen transportieren, werden über Seiten- oder Heckrampen beladen und entladen. Eingebaute Zwischendecks lassen sich entsprechend der Fahrzeughöhe adaptieren.<sup>26</sup>

Im Güterseeverkehr wird, verglichen mit den anderen Güterverkehrsträgern, weniger CO<sub>2</sub> ausgestoßen, oft sogar weniger als im Eisenbahngüterverkehr. Allerdings weist er erhebliche Schwefeloxid-Emissionsraten auf, da Seeschiffe mit Schweröl betrieben werden, das hohe Schwefelanteile aufweist.

Trotz der geringen Energieverbräuche pro Logistikeinheit erreichen Containerschiffe Geschwindigkeiten von ca. 45 km/h. Allerdings können sich die Transportzeiten von Deutschland nach Asien aufgrund von Vor- und Nachlauftransporten der ausgedehnten Fahrtstrecken und der Hafenoperationen auf etwa 30 Tage belaufen.<sup>27</sup>

---

<sup>26</sup> Vgl. Clausen & Geiger, 2013, S. 207 f.

<sup>27</sup> Vgl. Meisel, 2018, S. 1160.

### 2.2.5 Luftfrachtverkehr

Neben dem Seeschiffsgüterverkehr spielt auch der Luftfrachtverkehr eine wichtige Rolle im Interkontinentalverkehr. Flugzeuge und in selteneren Fällen auch Helikopter gelten als die gängigsten Luftfahrzeuge. Oft wird der Gütertransport in Kombination mit dem Personentransport durchgeführt, wobei die Ladekapazitäten für Gepäck auch für Luftfracht genutzt werden, „Belly-Freight“ genannt. Allerdings kommen auch reine Frachtflugzeuge sowie Kombiflugzeuge mit einem höheren Anteil an Ladekapazitäten im Luftfrachtverkehr zum Einsatz.<sup>28</sup>

Im Gegensatz zum Seeschiffsverkehr hat der Luftverkehr den Vorteil nicht an die Küste gebunden zu sein. Flughäfen können deshalb auch an Standorten sein, die ein hohes Verkehrsaufkommen aufweisen und sich in Ballungszentren befinden.

Der Luftfrachtverkehr weist wie alle Verkehrsträger einige Vor- und Nachteile auf. Aufgrund der hohen Fluggeschwindigkeiten von Flugzeugen, resultieren vor Allem auf langen Strecken kurze Transportzeiten. Außerdem sind Flugzeuge - außer im Bereich des Start- oder Zielflughafens beim Start und der Landung - nicht verkehrsgebunden, was die Zuverlässigkeit des Luftverkehrs erklärt.

Eines der Nachteile des Luftfrachtverkehrs sind die speziellen Paletten und Luftfrachtcontainer, die zum Einsatz kommen. Sie sind wichtig, um die unerlässliche besonders gute Ladungssicherung zu ermöglichen, damit den hohen dynamischen Belastungen und den strengen Luftsicherheitsvorschriften gefolgt werden kann. Jedoch sind die nicht auf die anderen Verkehrsträger abgestimmt.

Zudem ist ein Flugtransport sehr kostenintensiv. Hinzu kommt, dass ein Flugzeug verglichen mit den anderen Verkehrsträgern, außer dem Straßenverkehr, nur eine sehr beschränkte Ladekapazität zulässt. Deswegen nimmt bei der Fracht der Wert eine wichtigere Rolle ein als die Menge. Obwohl der Anteil an der Beförderungsmenge am niedrigsten ist, liegt der Anteil am beförderten Warenwert bei etwa 40 %.<sup>29</sup>

Der hohe Energieverbrauch des Luftfrachtverkehrs übersteigt alle anderen Verkehrsträger deutlich. Die resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen und Emissionen anderer Schadstoffe sind sehr groß. Zwar konnten die direkten Emissionen im Flugverkehr mit

---

<sup>28</sup> Vgl. Schäfer, 2019, S.166 f.

<sup>29</sup> Vgl. Bretzke, 2014, S.232.

dem Fortschritt der Technik über die letzten Jahrzehnte stets reduziert werden, jedoch ist der Aspekt der Umweltschädlichkeit von Flugzeugen und Helikoptern weiterhin sehr groß.<sup>30</sup>

Die Beladung von Flugzeugen erfordert eine aufwendige Planung, damit sowohl ein sicherer als auch ein wirtschaftlicher Flug erreicht werden kann. Die Schwerpunktlage eines Flugzeuges ist abhängig von der Lastverteilung der mitgeführten Ladung. Sie hat einen direkten Einfluss auf die Flugsicherheit und die Flugfähigkeit. Der Kerosinverbrauch und die entstehenden Emissionen unterliegen ebenfalls dem Einfluss der Lastverteilung.<sup>31</sup>

---

<sup>30</sup> Vgl. Large, 2012, S.62 f.

<sup>31</sup> Vgl. Clausen & Geiger, 2013, S.227.

## 3 Der Carbon Footprint in der Transportlogistik

### 3.1 Der Carbon Footprint

Um als Unternehmen eine Emissionsreduzierung zu bewirken, ist es notwendig die betriebliche CO<sub>2</sub>-Bilanz vollständig zu erfassen. Dadurch lässt sich die Zusammensetzung der Treibhausgase aufzeigen. Für die Bemessung hat sich zunehmend der *Carbon Footprint*, der Kohlenstoff-Fußabdruck, als Richtlinie durchgesetzt. Obwohl dieser medial des Öfteren thematisiert wird, gibt es in der Wirtschaftspolitik noch keine eindeutige bzw. einheitliche Definition. Für die weiteren Inhalte dieser Arbeit wird festgelegt, was genau der Carbon Footprint als Indikator bemisst. Dazu wird die Konkretisierung der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen verwendet.

Der Carbon Footprint gilt als die Menge an Emissionen, für die ein Land, eine Organisation, ein Unternehmen, eine Person oder ein anderer Stakeholder verantwortlich ist. Dabei werden sowohl die direkten als auch die indirekten Emissionsmengen berücksichtigt. Die Begriffe *GHG (greenhouse gas) inventory* und *GHG Footprint* werden des Öfteren in einigen Quellen als Synonyme des Carbon Footprint verwendet.

Das *CO<sub>2</sub>-Äquivalent* ist eine Maßeinheit, die für den Vergleich der verschiedenen Treibhausgase auf Basis ihres Erderwärmungspotentials dient, indem die Mengen der anderen klimarelevanten Gase wie beispielsweise Methan zur äquivalenten Menge von CO<sub>2</sub> hinsichtlich ihres Erderwärmungspotentials umgerechnet werden. Durch diese Vereinheitlichung entsteht eine einfachere Vergleichbarkeit.<sup>32</sup>

---

<sup>32</sup> Vgl. United Nations, o. D., S. 6-8.

### 3.2 Kategorisierung der Treibhausgasemissionen

Bei der Berechnung der Emissionen eines Unternehmens ist zuerst klarzustellen, ob die indirekten oder die direkten Emissionen berechnet werden sollen. Um beispielsweise Doppelzählungen zu vermeiden, wurde entsprechend des *Corporate Accounting and Reporting Standard* des *GHG Protocol* eine Kategorisierung vorgenommen. Dadurch ist es für Unternehmen einfacher die Emissionen der verschiedenen Emissionsquellen zu erfassen.

Die Abgrenzung von direkten und indirekten Emissionen ist notwendig, um Aussagen über die Gesamtemissionen zu treffen. Dadurch ist es möglich, für gesamte Regionen den Carbon Footprint zu berechnen, ohne Doppelzählungen vorzunehmen, denn beispielsweise sind die direkten Emissionen eines Kohlekraftwerkes zugleich die indirekten Emissionen des Unternehmens, welches den Strom aus besagtem Kohlekraftwerk bezieht und verbraucht. Bei der Klassifizierung des *GHG Protocol* unterscheidet man zwischen drei sog. *Scopes*, die sich zum Teil den direkten und indirekten Emissionen zuordnen lassen.

Als Scope-1-Emissionen bezeichnet man die direkten Emissionen. Hierbei handelt es sich ausschließlich um Emissionen, die von einem Unternehmen direkt ausgestoßen werden, also Ausstöße von Treibhausgasen, die bei Geschäftstätigkeit oder internen Prozessen entstehen. Häufig trägt die Produktion von Produkten, zum Beispiel bei lokaler Energieproduktion, oder der Transport dieser durch Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor einen großen Beitrag zu den Scope-1-Emissionen bei.

Scope-2-Emissionen sind indirekte Emissionen, die durch die Erzeugung von zugekaufter Energie entstehen und direkt mit dem Energiekonsum des Unternehmens verbunden sind. Gekaufter Strom ist oft eine Scope-2-Emission, da für die Stromerzeugung durch Versorgungsunternehmen als Folge der Verbrennung fossiler Brennstoffe Treibhausgase ausgestoßen werden. Bei den Versorgungsunternehmen zählen die gleichen Emissionen allerdings wiederum zu den Scope-1-Emissionen.<sup>33</sup>

Bei den Scope-3-Emissionen handelt es sich um indirekte Treibhausgasausstöße, welche aus der vor- und der nachgelagerten Wertschöpfungskette entstehen und für den Forschungszweck dieser Arbeit besonders relevant sind. Oft wird diese Kategorie

---

<sup>33</sup> Vgl. World Economic Forum, 2021, S. 6 f.

bei der Ökobilanzierung von Unternehmen nicht berücksichtigt, jedoch ist sie ebenfalls von Relevanz, um die ökologische Nachhaltigkeit eines Unternehmens und dessen Prozessen zu bestimmen. Ein wirksames Kohlenstoffmanagement sollte neben der Scope-1- und der Scope-2-Emissionen auch die Emissionen betrachten und minimieren, die nicht direkt oder indirekt von dem Unternehmen selbst erzeugt werden, sondern außerhalb der unternehmenseigenen Aktivitäten liegen.<sup>34</sup>

Zu den Scope-3-Emissionen zählen beispielweise Dienstreisen oder Arbeitswege der Mitarbeiter. Diese sind zwar kein Teil des Wertschöpfungsprozesses des Produkts oder der Dienstleistung des Unternehmens, werden aber indirekt durch die Nutzung von Verkehrsmitteln im Sinne des Unternehmens emittiert. Ebenfalls zur dritten Kategorie der Emissionen gehören Transportdienstleistungen durch Logistikunternehmen, weshalb der Fokus in den folgenden Kapiteln besonders auf den Scope-3-Emissionen liegen wird.<sup>35</sup>

Tabelle 1 zeigt einige Beispiele umweltrelevanter Bereiche in Unternehmen, welche den drei Scopes zugeordnet sind.

*Tabelle 1: Zuordnung umweltrelevanter Bereiche zu Scope 1 bis 3*

	Scope 1	Scope 2	Scope 3
Eigener Produktherstellungsprozess	X		
Geschäftsreisen/Arbeitswege der Mitarbeiter			X
Stromverbrauch eigener Lager		X	
Energieverbrauch eigener Verkehrsträger	X		
Eigene Energieproduktion	X		
Transportdienstleistungen durch Dritte			X
Herstellung von Kraftstoffen			X
Verbrauch von Fernwärme in den eigenen Gebäuden		X	

*Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Schmied & Knörr, 2013, S. 21*

<sup>34</sup> Vgl. Franchetti & Apul, 2012, S. 59 ff.

<sup>35</sup> Vgl. Schmied & Knörr, 2013, S. 21 f.

### **3.3 Ermittlung des Carbon Footprint von Transportdienstleistungen**

Um die Berechnung und Deklaration von Treibhausgasemissionen und Energieverbräuchen im Transportsektor zu vereinheitlichen, gibt es seit 2013 die DIN EN 16258 „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen“<sup>36</sup>. In den folgenden Kapiteln, in denen auf die DIN EN 16258 und dessen Vorgehen zur Ermittlung des Carbon Footprint eingegangen wird, werden die Inhalte aus dem Leitfaden „Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258“, der im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit entworfen wurde, herangezogen.

Bei dieser Norm wird die Summe der indirekten und direkten Emissionen gebildet, wodurch die Gesamtemissionen von Transportdienstleistungen errechnet werden. Nur wenn nach der genannten Norm zur Emissionsberechnung vorgegangen wird, kann am Ende ein aussagekräftiges, einheitliches und vergleichbares Ergebnis der Treibhausgasemissionen und Energieverbräuche von Transporten errechnet werden. Durch die Aufteilung der Ergebnisse eines Transportes auf die Sendungen (Allokation) resultieren die Emissionen jeder Einzelsendung.

Als Ergebnis erhält man alle Treibhausgase als CO<sub>2</sub>-Äquivalente und den Energieverbrauch. Dabei wird die gesamte Transportkette betrachtet, sowohl bei der Nutzung eigener Fahrzeuge als auch wenn Fahrzeuge durch Subdienstleister für den Transport verwendet werden. Bei der genannten Norm werden auch die Emissionen, die durch die Herstellung von Energieträgern wie z.B. Diesel entstanden sind, bilanziert und Leerfahrten miteinbezogen.

Es wird dementsprechend zwischen sogenannten „Tank-to-Wheel“ und „Well-to-Tank“ Energieverbräuchen und Emissionen unterschieden. Ersteres beschreibt die direkten beim Transportträger emittierten Treibhausgasausstöße bzw. die verbrauchte Energie. Zweiteres wiederum beschreibt die Emissionen bzw. Energie die für die Bereitstellung von Energieträgern ausgestoßen bzw. verbraucht werden. Hierfür enthält die Norm dazugehörige Umrechnungsfaktoren. „Well-to-Tank“ Energieverbräuche und Emissionen entstehen aus der Summe der zwei genannten Unterscheidungen.

---

<sup>36</sup> Vgl. Wittenbrink, 2015, S. 6 f.

Die Norm EN 16258 hat allerdings Systemgrenzen, durch die kein lückenloses Ergebnis errechnet werden kann. Zum einen beschränkt sie sich nur auf die direkten und indirekten Emissionen und Energieverbräuche von Transporten und berücksichtigt somit keine Umschlagsprozesse, Büros oder Kältemittelverluste. Außerdem findet keine Berücksichtigung der Herstellung, der Entsorgung oder des Unterhalts von Transportmitteln oder der Verkehrsinfrastruktur statt.<sup>37</sup> Trotzdem kann durch die Berechnung nach dieser Norm ein Ergebnis berechnet werden, das eine Optimierung hinsichtlich der Emissionen von Transportdienstleistungen ermöglicht.

---

<sup>37</sup> Vgl. Schmied & Knörr, 2013, S. 18 ff.

### **3.3.1 Vorgehen zur Berechnung der Treibhausgasemissionen nach DIN EN 16258**

Die Norm DIN EN 16258 gibt ein genaues Vorgehen zur Berechnung der Energieverbräuche und der Treibhausgasemissionen von Transportdienstleistungen vor. Sie schreibt vor, den gesamten Fahrzeugumlauf, bei dem eine Einzelsendung transportiert wird, zu betrachten. Dadurch wird sichergestellt, dass auch Leerfahrten betrachtet werden, also sowohl Fahrten zur Bereitstellung des Fahrzeuges als auch Fahrten zurück zum Standort.

Leerfahrten sind Fahrten von Transportfahrzeugen, bei denen keine Ladung transportiert wird. Das bedeutet, dass der Verkehrsträger auf dem Rückweg oder auf dem Weg zu einem neuen Transportauftrag keine Güter geladen hat. Leerfahrten sind in der Transportlogistik ein Problem, da sie zu ineffizienten und teuren Transportprozessen führen können und den Verkehr belasten. Leerfahrten können aufgrund von unzureichender Planung oder unerwarteten Änderungen in den Transportaufträgen entstehen. Sie führen zu zusätzlichem Kraftstoffverbrauch und folglich zu höheren Treibhausgasemissionen. Um Leerfahrten zu minimieren, müssen Transportunternehmen und Spediteure Strategien entwickeln, um die Auslastung der Transportkapazitäten zu maximieren und die Transportprozesse zu optimieren.

Der Fahrzeugumlauf wird als Fahrzeugeinsatzsystem (englisch: vehicles operations system, VOS) bezeichnet. Eine Leerfahrt gilt aber nur als solche, wenn das Fahrzeug, ohne einen nachfolgenden Transport auszuführen, zum Startpunkt zurückfährt, da die Fahrt sonst diesem zugerechnet werden müsste. Bei Containerschiffen zählt die gesamte Fahrt vom Startpunkt bis zum Zielhafen und zurück, auch wenn der untersuchte Container nur auf einer Teilstrecke befördert wird, als Fahrzeugeinsatzsystem. Auch bei einem Sammel- oder Verteilerverkehr muss die gesamte Tour als Fahrzeugeinsatzsystem gesehen werden und bei Leerfahrten muss eine anteilige Aufteilung auf alle Einzelsendungen erfolgen.

Die Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen erfolgt grundlegend in drei Schritten. Zuerst muss die Transportdienstleistung in die einzelnen Streckenabschnitte, in denen kein Wechsel des Transportmittels stattfindet, aufgeteilt werden. Im zweiten Schritt werden für jede Teilstrecke der Energieverbrauch und die Emissionen berechnet. Dafür muss das VOS für die jeweilige Teilstrecke festgelegt

werden. Dabei wird der Fahrzeugumlauf, die Route, der Fahrzeugtyp und Leerfahrten betrachtet. Im Anschluss an die Festlegung des VOS erfolgt die mengenmäßige Bestimmung des Energieverbrauchs, wie beispielsweise des Kerosinverbrauchs in Liter. Darauffolgend wird der errechnete Energieverbrauch des VOS in den standardisierten Energieverbrauch (Megajoule, MJ) und Treibhausgasemissionen (Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente) umgerechnet. Im letzten Teil des zweiten Schrittes folgt die Allokation der zwei vorher errechneten standardisierten Werte auf die Transportdienstleistung. Im dritten und letzten Schritt werden die Ergebnisse der Teilstrecken aufsummiert.<sup>38</sup>

---

<sup>38</sup> Vgl. Schmied & Knörr, 2013, S. 24.

### 3.3.2 Berechnung der Treibhausgasemissionen nach DIN EN 16258

Da bei einer Transportkette oft verschiedene Verkehrsträger zum Einsatz kommen, welche mit verschiedenen Energieträgern betrieben werden, müssen die einzelnen Tank-to-Wheel-Energieverbräuche der verschiedenen Transportabschnitte auf eine gleiche Einheit umgerechnet werden. Der Norm DIN EN 16258 zufolge müssen demnach im ersten Schritt die gemessenen Energieverbräuche (l, kWh und kg) in Megajoule umgerechnet werden. Hierfür gibt die Norm die entsprechenden Umrechnungsfaktoren an.

Die Well-to-Wheel-Treibhausgasemissionen werden ebenfalls anhand eines Umrechnungsfaktors ermittelt. Da dieser die Well-to-Tank-Treibhausgasemissionen miteinbezieht ist dieser größer als der Tank-to-Wheel-Umrechnungsfaktor.

Die Tank-to-Wheel-Treibhausgasemissionen ( $G_T$ ) und die Well-to-Wheel-Treibhausgasemissionen ( $G_W$ ) werden berechnet, indem man die jeweiligen gemessenen Energieverbräuche ( $F$ ) mit den entsprechenden THG-Emissionsfaktoren ( $g_T$  bzw.  $g_W$ ) multipliziert:

$$G_T = F \times g_T \text{ bzw. } G_W = F \times g_W$$

Die folgenden Emissionsfaktoren der verschiedenen Energieträger in Tabelle 2 sind dem Leitfaden zur „Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik“ entnommen.<sup>39</sup>

---

<sup>39</sup> Vgl. Schmied & Knörr, 2013, S. 28

Tabelle 2: Faktoren für die Treibhausgasemissionsberechnung berechnet als CO<sub>2</sub>-Äquivalente nach EN 16258

Energieträger	Tank-to-Wheel (g <sub>T</sub> )		Well-to-Wheel (g <sub>W</sub> )	
	kgCO <sub>2</sub> e/kg	kgCO <sub>2</sub> e/l	kgCO <sub>2</sub> e/kg	kgCO <sub>2</sub> e/l
Benzin	3,25	2,42	3,86	2,88
Ethanol	0,00	0,00	1,56	1,24
Benzin E5 <sup>1)</sup>	3,08	2,30	3,74	2,80
Benzin E10 <sup>2)</sup>	2,90	2,18	3,62	2,72
Diesel	3,21	2,67	3,90	3,24
Biodiesel	0,00	0,00	2,16	1,92
Diesel D7 <sup>3)</sup>	2,97	2,48	3,76	3,15
Diesel Deutschland <sup>4)</sup>	2,98	2,49	3,77	3,15
Erdgas (CNG)	2,68	k.A.	3,07	k.A.
Flüssiggas (LPG)	3,10	1,70	3,46	1,90
Kerosin <sup>5)</sup>	3,18	2,54	3,88	3,10
Schweröl (HFO)	3,15	3,05	3,41	3,31
Marine Diesel Oil (MDO)	3,24	2,92	3,92	3,53
Marine Gas Oil (MGO)	3,24	2,88	3,92	3,49

<sup>1)</sup> 5 Vol.-% Ethanol. - <sup>2)</sup> 10 Vol.-% Ethanol. - <sup>3)</sup> 7 Vol.-% Biodiesel. - <sup>4)</sup> 6,2% Beimischung von Biodiesel bezogen auf den Energiegehalt (2011) – entspricht 6,75 Vol.-% Biodiesel. <sup>5)</sup> HFO = Heavy Fuel Oil (Schweröl für Schiffe).

**Quelle:** Schmied & Knörr, 2013, S. 28

Bei temperaturgeführten Transporten muss zusätzliche Energie für die Temperierung aufgewendet werden. Wenn Kühlaggregate über den Dieseltank eines LKW betreiben werden, muss die zusätzliche Energie nicht separat errechnet werden, da sie bereits im Kraftstoffverbrauch des Fahrzeuges enthalten ist. Im Falle einer separaten Energieversorgung von Aggregaten können die Treibhausgasemissionen analog zur oben beschriebenen Vorgehensweise berechnet werden. Die Kältemittel, die ebenfalls klimawirksam sind, müssen aber nach der DIN EN 16258 nicht berücksichtigt werden.

Der nächste Schritt nach der Berechnung der Emissionen der einzelnen Streckenabschnitte ist die Allokation der Emissionen auf die Einzelsendungen. Hierfür gibt es mehrere verschiedene Ansätze. Die Norm empfiehlt grundsätzlich Tonnenkilometer, also das Produkt aus dem Sendungsgewicht und der tatsächlich zurückgelegten Entfernung, als Parameter zur Allokation zu verwenden.

Alternativ können auch andere Allokationsparameter verwendet werden, da der Parameter Tonnenkilometer nicht für alle Transporte angewendet werden kann. In solch einem Fall kann das Produkt aus Entfernung und Größe wie beispielsweise die Anzahl der Standardcontainer, Anzahl der Paletten oder das Volumen als Allokationsparameter herangezogen werden. Das macht besonders Sinn, wenn die Größe als Begrenzung des Transportes der maßgebende Faktor ist.

Wenn für einen zu berechnenden Transport keine Angaben zur Entfernung vorliegen, kann stattdessen für die Allokation auch das Gewicht oder die Anzahl der Einzelsendungen genommen werden. Das macht vor allem bei Kurier-, Express- oder Paketdienstleistungen Sinn, da bei diesen Arten von Transporten eine Entfernung pro Einzelsendung oft schwer zu erfassen ist. Es ist außerdem nach der Norm auch möglich, nur über die Entfernung die Treibhausgasemissionen zu ermitteln.

Da dem Nutzer eine Vielzahl an Allokationsparametern zur Auswahl steht, ist es von hoher Bedeutung die Allokationsgröße mit dem Ergebnis anzugeben, weil das Ergebnis abweicht, wenn nicht der empfohlene Allokationsparameter Tonnenkilometer verwendet wird.<sup>40</sup>

---

<sup>40</sup> Vgl. Schmied & Knörr, 2013, S. 27 ff.

### 3.3.3 Sonderfälle bei der Allokation

Für gewisse Sonderfälle, die eine Allokation erschweren, gibt die Norm EN 16258 vor, wie diese vorgenommen werden kann.

Zum einen werden für den Sammel- und Verteilerverkehr Empfehlungen für die Allokation gegeben. Um die Emissionen und den Energieverbrauch gerecht auf alle Einzelsendungen zu verteilen, soll die Reihenfolge, in der auf- bzw. abgeladen wird, außer Acht gelassen werden. Wenn die Entfernung zur Allokation verwendet wird, werden also nicht die Distanzen genommen, auf den eine Einzelsendung transportiert wird, sondern es sollen die gesamten Distanzen vom Start- bzw. Endpunkt zu den Auf- bzw. Abladepunkten auf die Einzelsendungen verteilt werden. Zur Bestimmung der kürzesten Distanz gibt die Norm zwei Möglichkeiten an. Es kann entweder die Luftlinie zwischen dem Start- bzw. Endpunkt zu den Auf- bzw. Abladepunkten oder der kürzeste realisierbare Weg genommen werden. Dies gilt aber nur für die Allokation, denn der Kraftstoffverbrauch muss durch die gefahrene Strecke ermittelt werden.

Ein weiterer Sonderfall ist der Transport von Fracht gemeinsam mit Passagieren auf demselben Verkehrsträger, wie beispielweise bei einer Belly-Fracht im Luftverkehr oder bei Fähren, die PKW und LKW transportieren. In solchen Fällen muss auf Basis der Gewichtsanteile zwischen den Passagieren und der Fracht aufgeteilt werden. Wenn im Luftverkehr von den Passagieren kein Gewicht vorliegt, wird allgemein von einem Gewicht von 100 Kilogramm pro Passagier inklusive Gepäck ausgegangen.<sup>41</sup>

---

<sup>41</sup> Vgl. Schmied & Knörr, 2013, S. 33ff.

### **3.4 Einflussfaktoren auf den Carbon Footprint in der Transportlogistik**

Um ein bestehendes Lieferantennetzwerk hinsichtlich der Transportlogistik umweltfreundlicher zu gestalten, sollten nach der Berechnung des Carbon Footprint die Einflussfaktoren auf die Umweltfreundlichkeit von Transporten analysiert und anschließend in ihrer Wirkung minimiert werden. Es ist wichtig, die Einflussfaktoren zu berücksichtigen, um nachhaltige Transportlösungen zu entwickeln. In dem folgenden Kapitel werden die allgemeinen Einflussfaktoren auf den Carbon Footprint analysiert.

Da die Norm zur Berechnung des Carbon Footprint in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurde, können nun Einflussfaktoren auf den Carbon Footprint ausgearbeitet werden. Im Anschluss können mithilfe der erarbeiteten Einflussfaktoren Strategien entwickelt werden, welche zu einer Emissionsreduzierung in der Transportlogistik führen.

Der Carbon Footprint in der Transportlogistik hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Im Folgenden werden die relevantesten allgemeinen Einflussfaktoren beschrieben.

Die Art des Transportmittels hat einen direkten Einfluss auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Wie bereits in Kapitel 2.4.5. erwähnt, zählt der Luftfrachtverkehr bzw. das Flugzeug als der Güterverkehrsträger mit den deutlich größten Treibhausgasemissionen, die Eisenbahn hingegen gilt als umweltfreundlichste Alternative.<sup>42</sup>

Die Effizienz des Transportmittels kann ebenfalls die CO<sub>2</sub>-Emissionen beeinflussen. Moderne und effiziente Fahrzeuge, Schiffe oder Flugzeuge sind oft effizienter und stoßen somit weniger Emissionen aus als ältere Modelle.

Hinzu kommt, dass die Leerfahrtenanteile und der Beladungsgrad des Verkehrsträgers den Carbon Footprint beeinflussen. Beide Parameter spielen eine Rolle bei der Allokation der Emissionen auf die Einzelsendungen.

Neben der Effizienz, hat auch die Art der Energiequelle, die für den Transport verwendet wird, einen Einfluss auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Mit fossilen Brennstoffen betriebene Antriebe beispielsweise sind schädlicher für die Umwelt als elektrische Antriebe oder alternative Kraftstoffquellen.

---

<sup>42</sup> Vgl. Wittenbrink, 2015, S. 21.

Die Entfernung bzw. die Routenwahl hat ebenfalls einen direkten Einfluss auf die Emissionen. Kürzere Routen verursachen in der Regel weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen, wenn man von demselben Verkehrsträger ausgeht. Hinzu kommt das Streckenprofil, denn Routen auf dem Landweg, welche viele Bergauf- und Bergabfahrten aufweisen, können für einen höheren Energieverbrauch und somit einen höheren Emissionsausstoß sorgen.

Das Gewicht der transportierten Gegenstände wirkt sich ebenfalls auf den Carbon Footprint aus. Schwerere Güter erfordern einen höheren Energieverbrauch und somit werden mehr Emissionen erzeugt. Eine Gewichtseinsparung bei den Gütern (z.B. durch die Verwendung anderer Materialien) und den Ladungsträgern, haben eine Emissionsreduzierung zur Folge.

Bei einer Belly-Fracht, z.B. im Flugzeug, hat die Personenanzahl einen Einfluss auf die allokierten Emissionen der Einzelsendungen. Zwar steigt der Energieverbrauch mit jeder Person minimal an, jedoch ist der Anteil der Einzelsendungen an den Emissionen höher, wenn der Raum für den Personentransport nicht optimal ausgenutzt wird.

Es gibt neben den genannten Einflussfaktoren noch weitere, wie beispielsweise die Fahrweise des Fahrers, jedoch können diese in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden, da an einer beispielhaften Supply Chain gearbeitet wird, welche nicht in der Realität beobachtet werden kann.

## 4 Strategien zur Minimierung des Carbon Footprint in der Transportlogistik

Durch die vorangegangene Analyse der Einflussfaktoren auf den Carbon Footprint können nun Ansätze entwickelt werden, die eine Emissionsreduktion in der Transportlogistik zur Folge haben. Die erarbeiteten Ansätze werden im Anschluss auf ein beispielhaftes Supply Chain Netzwerk angewendet, um dessen Klimawirksamkeit zu verringern. Neben den folgenden Optimierungsmaßnahmen gibt es noch einige weitere, die sich aber in dem Experiment nicht anwenden und überprüfen lassen und somit nicht berücksichtigt werden.

### 4.1 Wahl des Güterverkehrsträgers

Abbildung 2 macht deutlich, dass sich die verschiedenen Güterverkehrsträger in ihren Emissionen stark unterscheiden. Das hängt zum einen von der Antriebsart der jeweiligen Verkehrsmittel ab, wie aber auch vom Energieverbrauch.

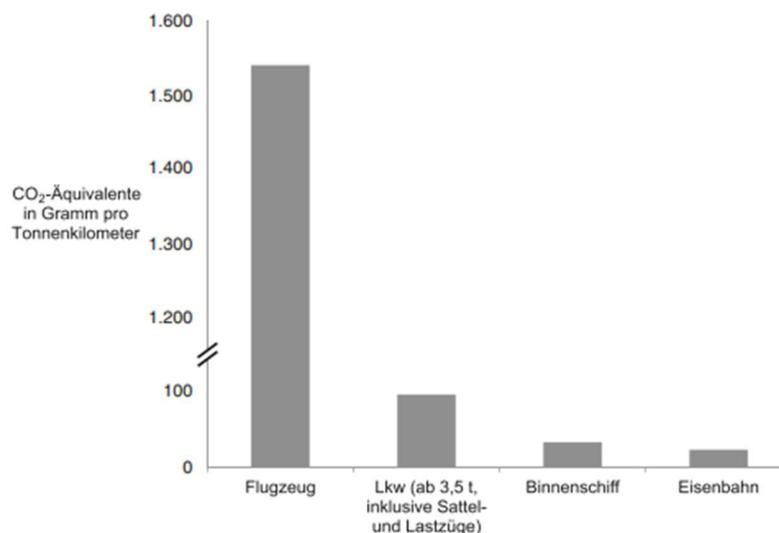


Abbildung 2: Emissionen der Verkehrsmittel. (TREMODO 2011)

Quelle: Clausen & Geiger, 2013, S.29

Die Wahl des Transportmittels hat also einen großen Einfluss auf den Carbon Footprint. Ein Flugzeug emittiert im Durchschnitt 1.539,60 Gramm pro Tonnenkilometer an Treibhausgasen als CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Lastkraftwagen, die nach

dem Flugzeug am meisten CO<sub>2</sub>-Äquivalente ausstoßen, emittieren hingegen durchschnittlich 97,5 Gramm pro Tonnenkilometer. Die Eisenbahn, die i.d.R. als umweltfreundlichster Verkehrsträger gilt, stößt durchschnittlich 23,4 Gramm pro Tonnenkilometer CO<sub>2</sub>-Äquivalente aus.<sup>43</sup>

Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist und in Kapitel 4.1 beschrieben wurde, ist der Schienengüterverkehr bzw. die Eisenbahn verglichen mit den anderen Verkehrsträgern das Transportmittel, das am wenigsten direkte Treibhausgase ausstößt. Da Eisenbahnen auf die Schieneninfrastruktur angewiesen sind, können sie nur für Binnentransporte verwendet werden.

## **4.2 Effiziente Transportkoordination**

Einen weiteren positiven Einfluss auf den Carbon Footprint hat auch eine effiziente Koordination der Transporte. Wenn mehrere Waren, auch mit verschiedenen Empfängern oder Versendern, mit einem Transportmittel transportiert werden, senkt das den Carbon Footprint der Einzelsendungen. Eine Vermeidung von Leerfahrten mithilfe einer guten Transportkoordination durch das eigene Unternehmen oder den Transportdienstleister wirkt sich positiv auf die Emissionen der einzelnen Sendungen aus.

Kooperationen mit anderen Unternehmen, beispielsweise durch den Aufbau eines Transportnetzwerkes, können hierbei zielführend sein. Ein solches Transportnetzwerk sollte transparente Lieferdaten für alle Kooperationspartner einsehbar machen, wodurch Liefertermine des einen Unternehmens mit den Lieferterminen eines anderen bestenfalls regional ansässigen Unternehmens gekoppelt werden können.

Zum einen kann somit eine Bündelung von Transporten mehrerer Unternehmen vorgenommen werden. Das bedeutet, dass der Beladungsgrad des Verkehrsträgers erhöht werden würde, was einen geringeren Carbon Footprint der einzelnen Sendungen zur Folge hat. Zum anderen kann mithilfe eines Transportnetzwerkes eine effiziente Transportkoordination ermöglicht werden, wodurch Leerfahrten verkürzt werden.

---

<sup>43</sup> Vgl. Wittenbrink, 2015, S.22.



### **4.3 Routenwahl**

Die Wahl der kürzesten Route senkt in der Regel den Energieverbrauch und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen. Das gilt nur bei einem gleichbleibenden Güterverkehrsträger. Ein Umstieg auf ein Transportmittel, welches grundsätzlich höhere Emissionen ausstößt, aber zum Beispiel aufgrund einer besseren Infrastruktur eine deutlich kürzere Route verwenden kann, kann demnach trotzdem auf die gesamte Transportdienstleistung weniger Treibhausgase ausstoßen und somit die umweltfreundlichere Transportmittelwahl sein.

### **4.4 Nutzung von modernen Transportmitteln**

Da die Energiequelle eines der Einflussfaktoren auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck ist, ist auch diese bei der Transportmittelwahl zu beachten. Verkehrsträger aus demselben Sektor können deutliche Unterschiede bei den direkten und indirekten Emissionen aufweisen. Wie bereits in Kapitel 2.4.2 (Schienengüterverkehr) erwähnt, gelten elektrisch betriebene Lokomotiven als umweltfreundlicher gegenüber den mit Diesel betriebenen Lokomotiven. Auch bei einem LKW sind deutliche Unterschiede bei den direkten Emissionen vorhanden, abhängig von der Schadstoffklasse.

Um durch eine höhere Effizienz des Verkehrsträgers eine geringere Treibhausgasemission zu bewirken, ist es sinnvoll bei der Transportmittelwahl auf moderne Modelle zurückzugreifen. Aufgrund von politischen Regularien, die die Produktion von immer effizienteren und umweltfreundlicheren Fahrzeugen vorschreiben, werden mehr moderne Verkehrsträger genutzt und dadurch weniger Treibhausgase emittiert.

#### **4.5 Ladungsgewichtsreduzierung**

Sowohl das Gewicht der Sendungen als auch das Transportvolumen wurden als Einflussfaktoren auf den Carbon Footprint analysiert. Bei besonders schweren Sendungen ist es möglich, dass das Maximalgewicht des Verkehrsträgers ausgelastet ist, jedoch nicht das gesamte Ladevolumen ausgeschöpft werden konnte. Das heißt, es werden weniger Einzelsendungen transportiert, als das Volumen hergeben würde. Durch eine Bündelung von mehreren Einzelsendungen mit verschiedenen Größen und Gewichten, kann eine optimale Nutzung des Transportvolumens und des maximal zulässigen Gewichts erzielt werden, wodurch effizientere Transporte zu Stande kommen.

## **5 Optimierung des Carbon Footprint in der Transportlogistik am Beispiel der Drohnenproduktion an der Hochschule Neu-Ulm**

Um die bisher ausgearbeiteten Ergebnisse zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Transportlogistik zu überprüfen, werden sie nun an einem Beispiel angewendet. In den folgenden Kapiteln wird zuerst das Beispielszenario einer bestehenden Lieferkette beschrieben und dessen Carbon Footprint errechnet. Im Anschluss wird die bestehende Transportlogistik hinsichtlich ihres Carbon Footprint optimiert, damit ein ökologisch nachhaltigeres Supply Chain Design entstehen kann.

Die Fakultät Informationsmanagement der Hochschule Neu-Ulm möchte eine Drohnenproduktion simulieren. Das bedeutet, dass die Studierenden die Aufgabe haben, die erworbenen Kenntnisse simulativ anzuwenden, beginnend mit der Firmengründung bis hin zur Erstellung eines Supply Chain Designs.

Ein Labor in der Hochschule soll als Montagelinie fungieren und die benötigten Komponenten werden vollständig von Zulieferern bezogen. Hierfür wird eine möglichst realitätsnahe Supply Chain als Ist-Zustand definiert, indem recherchiert wird, welche der weltweiten Märkte üblicherweise für die jeweiligen Komponenten Marktführer sind oder als Zulieferer schlichtweg am sinnvollsten sind.

## 5.1 Beispiel Drohnenproduktion an der Hochschule Neu-Ulm

Die verschiedenen Komponenten, welche für den Bau der Drohne benötigt werden, werden von den verschiedensten Zulieferern unterschiedlicher weltweiter Standorte bezogen. Wenn ein Zulieferer mehrere Komponenten liefern kann, wird davon ausgegangen, dass diese gemeinsam geliefert werden. Als Empfangsort dient bei allen Komponenten der Standort der Hochschule in Neu-Ulm.

Folgende Tabelle zeigt, welche Komponenten benötigt werden, welche Unternehmen als Zulieferer dienen könnten und wo deren Standorte sind. Es werden Unternehmen genannt, welche als realistische Zulieferer in Frage kommen könnten, weil sie beispielweise Marktführer bei der jeweiligen Komponente sind oder der Produktionsstandort für die jeweilige Komponentenklasse bekannt ist.

Tabelle 3: Benötigte Komponenten für Drohnenbau

Komponente	Zulieferer	Standort
Spritzgussteile: - Füße - Bodenplatte - Deckenplatte - Kameragehäuse	Ming Xiao Manufacturing Co., Ltd.	Ningbo, China
Bürstenloser Outrunner Motor	Neutronics Enterprises Inc.	San Diego (CA), USA
Lipo Akku 2200 mAh & Balance Charger	Changsha Kaipeng Energy Co, Ltd	Shenzhen, China
Schrauben: - M5*20mm + Mutter - M2*10mm + Mutter	Würth Industrie Service GmbH & Co. KG	Bad Mergentheim, Deutschland
Micro-Kamera	3rd Eye Electronics Co., Ltd	Shenzhen, China
Kabelbinder Industriequalität	Zhejiang Tolerance Electrical Co. Ltd.	Yueqing City, Wenzhou, Zhejiang, China
Flugregler stack	Matek Systems Co., Ltd.	Taichung, Taiwan
Flysky FS-i6X 10CH 2.4GHz	Shenzhen Flysky Technology Co.,Ltd.	Shenzhen, China
Propeller aus Kohlenstofffasern	Hintsteiner Group GmbH	Mürzhofen, Österreich

Quelle: eigene Darstellung

## 5.2 Gewicht der einzelnen Komponenten

Um den Carbon Footprint der Transporte für die genannten Komponenten der Drohne zu optimieren, wird zuerst der Carbon Footprint des bestehenden Supply Chain Netzwerkes ermittelt. Hierfür werden im ersten Schritt durch Hinzuziehung baugleicher oder ähnlicher Teile, welche auf Amazon.de bestellbar sind, die Gewichte definiert. Die folgende Tabelle zeigt, welches Gewicht die einzelnen Komponenten haben. Es ist wichtig zu beachten, dass die angegebenen Gewichte nur als Referenzpunkte dienen und in Realität unter Umständen leicht abweichen können. Bei den Komponenten, welche für eine Drohne nicht nur einmal benötigt werden, wie beispielweise der „bürstenlose Outrunner-Motor“, wird das Gesamtgewicht der benötigten Teile für eine Drohne angegeben.

Die Angabe der Gewichte der einzelnen Teile für den Bau der Drohne dient der späteren Allokation.

Tabelle 4: Gewicht der Komponenten

Komponenten	Gewicht	Hyperlink zu Vergleichsprodukt
Spritzgussteile	340g	<a href="https://www.amazon.de/Drohnenrahmen-Kit">https://www.amazon.de/Drohnenrahmen-Kit</a>
Bürstenlose Outrunner Motoren	192g	<a href="https://www.amazon.de/Bürstenloser-Outrunner-Motor">https://www.amazon.de/Bürstenloser-Outrunner-Motor</a>
Lipo Akku 2200 mAh	170g	<a href="https://www.amazon.de/Wiederaufladbare-Batterie">https://www.amazon.de/Wiederaufladbare-Batterie</a>
Balance Charger	790g	<a href="https://www.amazon.de/Balance-Ladegerät">https://www.amazon.de/Balance-Ladegerät</a>
Micro-Kamera	10g	<a href="https://www.amazon.de/Mirco-Kamera">https://www.amazon.de/Mirco-Kamera</a>
Flugregler-Stack	110g	<a href="https://www.amazon.de/SPEEDY-BEE-Flugregler-Stack">https://www.amazon.de/SPEEDY-BEE-Flugregler-Stack</a>
Flysky FS-i6X 10CH 2.4GHz	600g	<a href="https://www.amazon.de/Transmitter-mit-Empfänger">https://www.amazon.de/Transmitter-mit-Empfänger</a>
Propeller aus Kohlenstofffasern	22g	<a href="https://www.amazon.de/Propeller-Kohlenstoff">https://www.amazon.de/Propeller-Kohlenstoff</a>
Kabelbinder	1,6g	<a href="https://www.amazon.de/Kabelbinder-Industrie-Zugkraft">https://www.amazon.de/Kabelbinder-Industrie-Zugkraft</a>
M5 x 20mm Schrauben mit Muttern	41,3g	<a href="https://www.amazon.de/m5+20mm+schraube+mutter">https://www.amazon.de/m5+20mm+schraube+mutter</a>
M2 x 10 mm Schrauben mit Muttern	1,8g	<a href="https://www.amazon.de/m2+10mm+schraube+mutter">https://www.amazon.de/m2+10mm+schraube+mutter</a>

Quelle: eigene Darstellung

Bei den Spritzguss-Kunststoffteilen wurde ein Vergleichsangebot gewählt, welches als Set aus Füßen, Bodenplatte und Deckenplatte sowie den dazugehörigen Schrauben besteht. Bei diesem Angebot ist kein Kameragehäuse dabei, es kann aber davon ausgegangen werden, dass hier ein realistisches Vergleichsgewicht vorliegt, da die Deckenplatte des gewählten Artikels Platinen integriert hat und die Schrauben der „Hochschul-Drohne“ separat bezogen werden. Da die Spritzgussteile alle vom gleichen Hersteller bezogen werden, ist es nicht nötig die Gewichte der einzelnen Komponenten zu ermitteln. Das gilt auch für Komponenten, welche in größeren Sets als Vergleichsartikel angeboten werden, wie zum Beispiel die Kabelbinder.

### **5.3 Ermittlung des Carbon Footprint der Transporte für eine Drohne**

Zur Ermittlung des Carbon Footprint der einzelnen Komponenten wird das öffentlich zugänglichen Rechentool Eco-Transit World verwendet. Diese Software dient unter anderem dazu, den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen von Transportdienstleistungen nach DIN EN 16258 zu berechnen. Hierbei können alle Berechnungsparameter eingegeben werden. Der Leerfahrtenanteil und der Beladungsgrad kann zwar individuell angepasst werden, kann aber auch durch die Software befüllt werden. Hierfür verwendet die Software statistische Daten oder bei einzelnen Transportträgern auch Daten, welche durch die ausführenden Unternehmen übermittelt wurden, wie beispielweise von europäischen Bahnunternehmen.

Der Emissionsrechner beachtet infrastrukturelle Begebenheiten. Das bedeutet, dass beispielweise bei dem Verkehrstyp Flugzeug bereits davon ausgegangen wird, dass der Transport vom Versandort zum Startflughafen und vom Zielflughafen zum Empfangsort durch einen LKW ausgeführt wird. Nachfolgende Tabelle 5 zeigt die durch den Emissionsrechner errechneten CO<sub>2</sub>-Äquivalente des ursprünglichen Supply Chain Netzwerkes.

Tabelle 5: Ursprünglicher Carbon Footprint der Komponenten (als CO<sub>2</sub>-Äquivalent in Tonnen)

Komponenten	Verkehrstyp	CO <sub>2</sub> -Äquivalent (WTW) in Tonnen
Spritzgussteile	Seeschiff	0,000052 (siehe Anhang 1)
Bürstenlose Outrunner Motoren	Flugzeug	0,0013362 (siehe Anhang 2)
Lipo Akku 2200 mAh	Flugzeug	0,0011478 (siehe Anhang 3)
Balance Charger	Flugzeug	0,0053341 (siehe Anhang 4)
Micro-Kamera	Flugzeug	0,000067520 (siehe Anhang 5)
Flugregler-Stack	Flugzeug	0,0007610 (siehe Anhang 6)
Flysky FS-i6X 10CH 2.4GHz	Flugzeug	0,0040512 (siehe Anhang 7)
Propeller aus Kohlenstofffasern	LKW	0,00000089 (siehe Anhang 8)
Kabelbinder	Flugzeug	0,000010564 (siehe Anhang 9)
M5 x 20 mm Schrauben mit Muttern	LKW	0,00000050 (siehe Anhang 10)
M2 x 10 mm Schrauben mit Muttern	LKW	0,000000022 (siehe Anhang 11)
	<b>gesamt</b>	<b>0,012761796</b>

Quelle: eigene Darstellung

Die Berechnungen des Emissionsrechners kamen zu dem Ergebnis, dass die Summe der CO<sub>2</sub>-Äquivalente für den Transport der Komponenten, die für den Bau einer Drohne benötigt werden bei ca. 12,76 Kilogramm liegt.

Alle elektronischen Bauteile kommen aus dem asiatischen Raum oder den USA. Wie in Kapitel 2.4.1. erwähnt, werden Elektrobauteile mit zunehmender Tendenz mit dem Flugzeug transportiert, weshalb hier festgelegt wurde, dass das auf alle elektronischen Bauteile der Drohne zutrifft. Ladungsträger wie beispielsweise Euro-Paletten wurden bei diesen Berechnungen noch nicht mit beachtet.

## **5.4 Optimierung des Carbon Footprint**

Die erarbeiteten Ansätze, welche eine Optimierung des Carbon Footprint erzielen sollen, werden in den folgenden Kapiteln angewendet. Es wird untersucht, inwiefern sich ein Umstieg auf alternative Verkehrsträger, der Aufbau eines Transportnetzwerkes, die Nutzung modernerer Verkehrsträger und eine Gewichtsreduzierung auf den Treibhausgasausstoß auswirken. Alle Berechnungen werden auch in diesem Teil der Arbeit mit dem bereits verwendeten Emissionsrechner getätigt.

### **5.4.1 Nutzung alternativer Verkehrsträger**

Im ersten Schritt des Experiments wird untersucht, inwiefern sich der Ausstoß an Treibhausgasen ändert, wenn andere umweltfreundlichere Transportmittel verwendet werden. Dabei wird auf ein Flugzeug verzichtet, da es als besonders umweltschädlich gilt. Transporte aus Asien und den USA werden stattdessen weitestgehend mit dem Seeschiff unternommen. Außerdem werden die innereuropäischen Transporte so weit wie möglich durch die Eisenbahn vollzogen. Auch für diese Berechnungen wird der Emissionsrechner der „IVE mbH“ verwendet.

Tabelle 6: Carbon Footprint der Komponenten (als CO<sub>2</sub>-Äquivalent in Tonnen) bei Nutzung alternativer Verkehrsträger

Komponenten	Verkehrstyp	CO <sub>2</sub> -Äquivalent (WTW) in Tonnen
Spritzgussteile	Seeschiff	0,000052 (siehe Anhang 12)
Bürstenlose Outrunner Motoren	Seeschiff	0,000033 (siehe Anhang 13)
Lipo Akku 2200 mAh	Seeschiff	0,0000245 (siehe Anhang 14)
Balance Charger	Seeschiff	0,000114 (siehe Anhang 15)
Micro-Kamera	Seeschiff	0,00000144 (siehe Anhang 16)
Flugregler-Stack	Seeschiff	0,0000166 (siehe Anhang 17)
Flysky FS-i6X 10CH 2.4GHz	Seeschiff	0,000086 (siehe Anhang 18)
Propeller aus Kohlenstofffasern	Eisenbahn	0,00000013 (siehe Anhang 19)
Kabelbinder	Seeschiff	0,000000244 (siehe Anhang 20)
M5 x 20 mm Schrauben mit Muttern	Eisenbahn	0,00000014 (siehe Anhang 21)
M2 x 10 mm Schrauben mit Muttern	Eisenbahn	0,000000061 (siehe Anhang 22)
	<b>gesamt</b>	<b>0,0003280601</b>

Quelle: eigene Darstellung

Die Tabelle zeigt die einzelnen Drohnenbauteile mit den jeweiligen Verkehrstypen, welche aus der vorangegangenen Analyse als umweltfreundlichere Alternativen ermittelt wurden und die berechneten Treibhausgasausstöße (in Tonnen). Auch bei diesen Berechnungen wurden Ladungsträger nicht mit einberechnet.

Es wird hier auf den Einsatz von Flugzeugen verzichtet. Stattdessen wird das Seeschiff für die interkontinentalen Transporte verwendet. Für den Transport zu den Flughäfen bzw. von den Flughäfen zum Empfänger dienen LKW. Für die innereuropäischen Transporte wird – soweit infrastrukturell möglich – auf den LKW verzichtet und die Eisenbahn verwendet.

Das Ergebnis der Tabelle 6 zeigt, dass allein durch den Umstieg auf umweltfreundlichere Verkehrsträger eine deutliche Einsparung an Treibhausgasemissionen erzielt werden kann. Das Gewicht der ausgestoßenen CO<sub>2</sub>-

Äquivalente beim Transport der Komponenten für eine Drohne liegt bei ca. 328 Gramm. Das bedeutet eine Einsparung von rund 12,43 kg an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, was ca. 97% entspricht.

Der Umstieg vom Flugzeug auf das Seeschiff bedeutet deutlich längere Lieferzeiten. Das heißt, dass die Bestellzyklen und der Komponenten-Lagerbestand dementsprechend angepasst werden müssen, damit es nicht zu Produktionsengpässen kommt.

#### 5.4.2 Aufbau eines Transportnetzwerkes

Bei den vorangegangenen Berechnungen der Emissionen in Tabelle 5 und Tabelle 6 wurde der Leerfahrtenanteil und der Beladungsgrad basierend auf statistischen Daten oder Daten von Unternehmen bzw. Organisationen der verschiedenen Verkehrsträger durch den Emissionsrechner miteingerechnet. Eine Reduzierung der Leerfahrtenanteile und Erhöhung des Beladungsgrades kann effizientere Transportprozesse zur Folge haben.

Ein potenzielles Kooperationsunternehmen könnte zum Beispiel die Settele GmbH & Co. KG sein. Das ebenfalls in Neu-Ulm ansässige Unternehmen produziert unter anderem Fertigerichte<sup>44</sup>. Unter der Annahme, dass die Settele GmbH und Co. KG Verpackungsmaterialien aus China bezieht, könnte eine Bündelung von Transporten bzw. Transportabschnitten für effizientere Transporte beider Unternehmen sorgen.

Der Emissionsrechner gab bei den vorangegangenen Berechnungen an, dass Beförderungen aus China mit dem Seeschiff über den Suez-Kanal in Venedig (Italien) umgeschlagen werden und von dort mit dem LKW bei einem Beladungsgrad von 60 Prozent und einem Leerfahrtenanteil von 20 Prozent nach Neu-Ulm befördert werden. Würde eine Bündelung dieses letzten Transportabschnittes stattfinden und der hierfür verwendete LKW durch die Settele GmbH & Co. KG im Anschluss mit einer neuen Fracht beladen werden, hätte das eine Reduktion des Leerfahrtenanteils sowie eine Erhöhung des Beladungsgrades zur Folge.

Exemplarisch wird im Folgenden das WTW-Emissionsergebnis der genannten Strecke von Venedig nach Neu-Ulm als Folge einer Transportbündelung mit den ursprünglichen Parametern – Leerfahrtenanteil 20% und Beladungsgrad 60% – mit den Emissionsergebnissen derselben Strecke und derselben Gütermenge bei einem Beladungsgrad von 90% und einem Leerfahrtenanteil von 5% verglichen.

Bei Angabe der ursprünglichen auf statistischen Daten basierenden Parameter kommt der Emissionsrechner beim Transport von einer Tonne Stückgut auf ein Ergebnis von 41 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente (siehe Anhang 23). Dem gegenüber würde derselbe Transport bei einem Beladungsgrad von 90% und einem Leerfahrtenanteil von 5% nur 29 kg (siehe Anhang 24) emittieren. Das bedeutet, dass in diesem Fall durch eine sinnvolle

---

<sup>44</sup> Vgl. Settele GmbH & Co. KG, 2023.

Koordination des Güterverkehrsträgers über ein Viertel an Treibhausgasausstößen auf diesem Streckenabschnitt eingespart werden würden.

### **5.4.3 Nutzung moderner Verkehrsträger**

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass modernere Verkehrsträger geringere Schadstoffausstöße herbeiführen. Gesetzliche Normen geben den Herstellern vor, wie hoch die Schadstoffgrenzen sein dürfen. Lastkraftwagen, die in der EU zugelassen werden, werden beispielsweise nach ihrem Emissionsausstoß klassifiziert. Derzeit reichen die sog. Schadstoffklassen von „Euro 1“ bis „Euro 6“, wobei Euro 6 als umweltfreundlichste Schadstoffklasse gilt. Über die Jahre wurden immer höhere Schadstoffklassen eingeführt, welche neu zugelassene LKW erfüllen müssen.<sup>45</sup>

Die vorangegangene Berechnung (Anhang 23) aus Kapitel 5.4.2. beschreibt den Schadstoffausstoß eines Transportes von einer Tonne losen Stückguts von Venedig nach Neu-Ulm (532,73 km) mit dem LKW. Bei dieser Berechnung wurde davon ausgegangen, dass der LKW der Schadstoffklasse Euro 6 entspricht, also der umweltfreundlichsten Schadstoffklasse angehört. Zum Vergleich wird nun derselbe Transport mit exakt denselben Parametern berechnet, nur unter der Annahme, dass ein LKW der Schadstoffklasse Euro 6 entspricht und dieser mit einem weiteren LKW der Schadstoffklasse 2 verglichen wird.

Der Emissionsrechner kommt bei dem LKW der Schadstoffklasse Euro 2 auf ein WTW-Emissionsergebnis von 45kg, bei dem LKW der Schadstoffklasse Euro 6 auf ein Ergebnis von 41kg an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (siehe Anhang 25).

---

<sup>45</sup> Vgl. [bussgeldkatalog.org](http://bussgeldkatalog.org), 2023.

### 5.4.5 Gewichtsreduzierung

Durch eine Gewichtseinsparung bei der Ladung bzw. den Ladungen, würde sich der Carbon Footprint der Einzelsendungen verringern. Um bei demselben Zulieferernetzwerk und somit denselben Komponenten zu bleiben, wird in diesem Kapitel davon abgesehen eine Gewichtsreduzierung der Komponenten an sich zu erzielen.

Stattdessen kann auch eine Gewichtersparnis an den Ladungsträgern zielführend sein. Ein häufig eingesetzter Ladungsträger ist die sog. Europalette. Es handelt sich hierbei um eine genormte Palette aus Holz mit den Maßen 14cm x 80cm x 120cm und einem Gewicht von 22 kg<sup>46</sup>.

In den vorangegangenen Kapiteln zur Berechnung der Treibhausgasausstöße wurden die Ladungsträger nicht miteinberechnet. Ist die Anzahl der Komponenten sowie das Gewicht der dazugehörigen Ladungsträger bei einer bestimmten Lieferung bekannt, muss das Gewicht der Ladungsträger anteilig der Anzahl der Komponenten zugerechnet werden, um ein valides Ergebnis über den Treibhausgasausstoß des Transportes einer Komponente zu berechnen. Allerdings liegen beim in dieser Arbeit verwendeten Supply-Netzwerk keine Daten über die Verpackungen und die Anzahl der Komponenten pro Ladungsträger vor.

Um trotzdem ein aussagekräftiges Ergebnis über die Veränderung des Carbon Footprint durch eine Ladungsgewichtersparnis zu treffen, wird im Folgenden der Treibhausgasausstoß einer Europalette mit dem einer leichteren Kunststoffpalette mit den gleichen Maßen, welche 5kg wiegt<sup>47</sup>, verglichen. Die Berechnung bezieht sich nur auf die beiden Paletten, ohne Beladung. Es wird die Strecke von Shenzhen (China) nach Neu-Ulm herangezogen und davon ausgegangen, dass die Paletten mit dem Seeschiff und in den vor- bzw. nachgelagerten Transporten mit dem LKW befördert werden.

Bei einer herkömmlichen Europalette aus Holz kommt der Emissionsrechner auf ein WTW-Ergebnis von 3,17kg an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (siehe Anhang 26). Wird für dieselbe

---

<sup>46</sup> Vgl. BAUHAUS E-Business Gesellschaft für Bau- und Hausbedarf mbH & Co. KG., 2023.

<sup>47</sup> Vgl. Rollawaycontainer.com, 2023.

Strecke bei gleichbleibenden Güterverkehrsträgern eine Kunststoffpalette verwendet, so kommt der Emissionsrechner auf ein Ergebnis von 0,72 kg (siehe Anhang 27).

Die Ergebnisse machen deutlich, dass eine Gewichtsreduzierung der Ladung einen positiven Einfluss auf den Carbon Footprint hat. Diese Berechnungen zeigen lediglich den Treibhausgasausstoß der Paletten an sich. Um den Carbon Footprint einer Komponente zu ermitteln, muss das Gewicht des genutzten Ladungsträgers anteilig zum Gewicht der Komponenten addiert werden. Es wird von einer Mehrfachverwendung der Paletten ausgegangen.

## 6 Diskussion

Die Ergebnisse des Experiments aus den vorangegangenen Kapiteln veranschaulichen, dass die herausgearbeiteten Ansätze zur Optimierung des Carbon Footprint in der Transportlogistik zielführend sind. Eine dementsprechend angepasste Lieferkette kann somit umweltfreundlicher gestaltet werden.

Das verwendete Rechentool war hierbei sehr hilfreich, denn es können sämtliche Parameter für die Berechnung eingegeben werden und nach Abschluss kann jede Berechnung in Form eines detaillierten Berichts ausgegeben werden. Da das Tool die Vorgaben der DIN 16258 beachtet, ist es für die Berechnungen in dieser Arbeit geeignet.

Im ersten Teil des Experiments wird die Transportmittelwahl thematisiert. In diesem spezifischen Fallbeispiel konnte ein großer Teil an Treibhausgasen durch den Umstieg auf alternative Güterverkehrsträger eingespart werden. Das liegt vor allem daran, dass das Flugzeug in der ursprünglichen Lieferkette für die meisten Komponenten genutzt wurde.

Im Anschluss wurde der Aufbau eines Transportnetzwerkes thematisiert. In dieser Arbeit wurde exemplarisch ein regional ansässiges Unternehmen als potenzielles Partnerunternehmen festgelegt. Schließlich wurde bei den Berechnungen davon ausgegangen, dass durch solch eine Partnerschaft der Beladungsgrad erhöht und Leerfahrtenanteil verringert werden kann. Die verwendeten Parameter wurden rein simulativ ausgewählt und sollten lediglich die Auswirkungen auf den Carbon Footprint aufzeigen. Die Ergebnisse zeigen, dass einer Erhöhung des Beladungsgrades und einer Verringerung des Leerfahrtenanteils geringere Emissionen je Sendung folgen. In einem realen Szenario müsste ein umfassendes Transportnetzwerk mit vielen Partnerunternehmen aufgebaut werden, um durch effizientere Transporte die Treibhausgasemissionen pro Einzelsendung zu verringern.

Anschließend wurden zwei Transporte derselben Strecke verglichen. Dabei wurde zwar in beiden Fällen der LKW als Verkehrsträger verwendet, jedoch mit unterschiedlichen Schadstoffklassen. Die Ergebnisse bestätigen die Annahme, dass modernere LKW, also LKW einer höheren Schadstoffklasse, einen geringeren Schadstoffausstoß haben und somit für einen geringeren Carbon Footprint von Transportdienstleistungen sorgen können.

Im letzten Teil des Experiments wurde ermittelt, wie sich eine Gewichtsreduzierung der Ladung auf den Treibhausgasausstoß auswirkt. In diesem Fall wurde durch den Umstieg auf Paletten aus Plastik, welche ein geringeres Gewicht haben, das Ladungsgewicht reduziert, da keine genauen Informationen zur Anzahl und zur Größe der Komponenten vorhanden waren. Das Ergebnis zeigt, dass eine Gewichtsreduzierung von Ladungen einen geringeren Ausstoß an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten zur Folge hat. In einem realen Szenario kann auch durch andere Maßnahmen eine Gewichtsreduzierung erzielt werden. Der Umstieg auf leichtere Komponenten, welche die geforderten Ansprüche erfüllen und vom selben Hersteller kommen, wäre ebenso zielführend.

Da sich diese Arbeit nur auf den Carbon Footprint von Transporten bezieht, werden Treibhausgasemissionen, welche beispielsweise an den Umschlagplätzen oder durch die transportbedingte Verpackung entstehen, nicht beachtet. Es kann neben den Transporten an sich auch an weiteren Stellen der Lieferkette hinsichtlich geringerer Emissionen optimiert werden. Der Aspekt der Routenwahl wird in dem Experiment nicht behandelt, da der Emissionsrechner die Transportentfernungen eigenständig unter Berücksichtigung der Topografie, des Straßentyps, des Traktionstyps, der Gewässerklassen und der Kanalgrößen berechnet.

Zur Optimierung einer realen Lieferkette kann eine der aktuellen Verkehrssituation angepasste Route sinnvoll sein, da dadurch zum Beispiel Verkehrsstaus, welche den Kraftstoffverbrauch erhöhen, umfahren werden könnten. Außerdem stehen der ausführenden Person möglicherweise mehr Informationen, wie beispielsweise die genauen Emissionswerte des genutzten Verkehrsträgers oder exakte Routenangaben, zur Verfügung. So lassen sich genauere Emissionswerte ermitteln, wodurch eine Optimierung effizienter durchgeführt werden kann.

## 7 Fazit

Die Forschungsarbeit ging der zentralen Frage nach, wie sich ein bestehendes Lieferantennetzwerk hinsichtlich der Lieferkette optimieren lässt, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren.

Um den Forschungsbedarf aufzuzeigen, wurde im ersten Teil der Arbeit die umweltpolitischen Rahmenbedingungen dargelegt. Dabei ging hervor, dass der Klimaschutz auch aus unternehmerischer Sicht zunehmend an strategischer Relevanz gewinnt. Das stetige Wachstum des Transportsektors wirkt sich negativ auf den Klimawandel aus, weshalb der Ausbau einer „grünen“ Transportlogistik aus heutiger Sicht ein wichtiger Bestandteil jedes Unternehmens sein sollte.

Im Anschluss wurden die verschiedenen Güterverkehrsträger mit ihren relevantesten Vor- und Nachteilen, sowie deren gängigen Einsatzszenarien beschrieben. Außerdem wurde auf deren Anteile am gesamten Transportaufkommen eingegangen. Dabei ging hervor, dass der Straßengüterverkehr mit großem Abstand den größten Anteil am Transportaufkommen einnimmt.

Damit Optimierungsansätze im späteren Verlauf der Arbeit ermittelt und bewertet werden konnten, wurde eine Analyse der DIN EN 16258 vorgenommen. Durch die genaue Betrachtung der Vorgehensweise zur Ermittlung der transportbedingten Emissionen nach DIN EN 16258 konnten folglich einige Einflussfaktoren auf den Carbon Footprint herausgearbeitet werden.

Die Ermittlung von Einflussfaktoren auf den Carbon Footprint von Transportprozessen ermöglichen die Erschließung von Optimierungsansätzen. Zum einen kann die Routenwahl einen Einfluss auf die Treibhausgasemissionen haben. Dies trifft vor Allem auf den Straßengüterverkehr zu, da er durch eine ausgeprägte Infrastruktur gekennzeichnet ist. Längere Strecken oder Strecken mit vielen Steigungen können höhere Emissionen zur Folge haben als kürzere bzw. flachere Routen.

Des Weiteren ging hervor, dass sich die Nutzung von moderneren Modellen der jeweiligen Güterverkehrsträger positiv auf den Carbon Footprint auswirkt, da politische Regularien immer strengere Vorgaben zu den Emissionswerten von neuen Güterverkehrsträgern vorschreiben.

Als weiterer Optimierungsansatz ging hervor, dass die Wahl des Güterverkehrsträgers einen großen Einfluss auf die transportbedingten Emissionen hat. Die verschiedenen Transportmittel weisen deutliche Unterschiede in ihren Emissionen pro Tonnenkilometer auf. Da der Lufttransport die schlechtesten Emissionswerte mit sich bringt, sollte grundsätzlich der Seeschiffsverkehr für Überseetransporte bevorzugt werden. Außerdem sollten nach Möglichkeit Transporte vom Straßengüterverkehr auf den Eisenbahngüterverkehr verlagert werden, um den Straßenverkehr zu entlasten und die umweltfreundlichere Variante für Transporte zu Lande zu nutzen.

Auch das Gewicht der transportierten Güter hat einen Einfluss auf den Energieverbrauch und somit auch auf den Carbon Footprint. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass jegliche Gewichtsreduktion der transportierten Güter, der Ladungsträger oder von Verpackungsmaterialien geringere Emissionen mit sich bringt.

Als letzter Einflussfaktor auf den Carbon Footprint wurde der Leerfahrtenanteil und der Beladungsgrad ermittelt. Beide Parameter gehen mit in die Berechnung von Emissionen ein. Ziel beim Aufbau einer effizienten Transportlogistik sollte es sein, den Beladungsgrad zu maximieren und den Leerfahrtenanteil zu minimieren.

Die verschiedenen ermittelten Optimierungsansätze wurden in einem Experiment angewendet und somit hinsichtlich ihrer Relevanz und ihrer Effektivität geprüft. Hierfür wurde zuerst eine Lieferkette als Ist-Zustand definiert. Im Anschluss wurde der Carbon Footprint der Transporte aller Komponenten, die für das Produkt benötigt werden, mithilfe eines Emissionsrechners ermittelt. Folglich wurden die herausgearbeiteten Optimierungsansätze auf diese Lieferkette angewendet, indem mögliche Durchführungsoptionen angegeben wurden.

Anschließend wurde nach Anwendung der verschiedenen Ansätze erneut der Carbon Footprint durch den Emissionsrechner errechnet, um diese zu validieren. Dadurch ergab sich die Gewissheit, dass die erarbeiteten Optimierungsansätze eine Emissionsreduktion zur Folge haben und somit zur Gestaltung einer umweltfreundlicheren Transportlogistik beitragen.

Damit dem Klimawandel entgegengewirkt werden kann, sollten Unternehmen ihre Transportlogistik optimieren. Neben der Reduktion des Carbon Footprint von internen Produktionsprozessen oder nachgelagerten Prozessen, müssen auch vorgelagerte Transportprozesse im Fokus des Umweltmanagements von Unternehmen stehen. In

Zukunft könnten unter anderem strengere gesetzliche Regularien, welche beispielsweise Transporte durch Flugzeuge verbieten bzw. erschweren oder höhere Mautgebühren für Lastkraftwagen dazu führen, dass Unternehmen ihre Lieferkette umweltfreundlicher gestalten. Parallel muss ein Ausbau der Infrastrukturen der Verkehrsträger mit geringeren Emissionen pro Tonnenkilometer stattfinden. Durch den Ausbau des deutschen Schienennetzes und dessen Elektrifizierung, kann der Anteil des Straßengüterverkehrs am gesamten Transportaufkommen reduziert werden. Hinzu kommt, dass in diesem Zuge auch der vollständige Umstieg auf erneuerbare Energien stattfinden muss. Es besteht dringender Handlungsbedarf, sowohl für die Politik als auch für die Wirtschaft, um dem Klimawandel entgegenzuwirken und die Erde für künftige Generationen als lebenswerten Ort zu hinterlassen.

## Literaturverzeichnis

BAUHAUS: Europalette (L x B x H: 120 x 80 x 14 cm, Unbehandelt) | BAUHAUS, in: XXXXX, o. D., [online]

<https://www.bauhaus.info/europaletten/europalette/p/25731376> (abgerufen am 01.06.2023).

Berndt, Thomas: Eisenbahngüterverkehr, 01.01.2001, [online] doi:10.1007/978-3-322-80131-9, S.136.

Brasseur, Guy P./Daniela Jacob/Susanne Schuck-Zöller: Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven, Springer-Verlag, 31.10.2016, S.2.

Bretzke, Wolf-Rüdiger: Nachhaltige Logistik, in: Springer eBooks, 01.01.2014, [online] doi:10.1007/978-3-662-43845-9, S.232.

Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Infrastruktur, 21.12.2022, [online] <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/infrastruktur-statistik.html> (abgerufen am 23.02.2023).

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Klimaschutz in Zahlen, in: bmu.de, 01.06.2021, [online] <https://www.bmu.de/publikation/klimaschutz-in-zahlen-2021> (abgerufen am 16.12.2022).

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung: Klimaabkommen von Paris, in: Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, o. D., [online] <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/klimaabkommen-von-paris-14602> (abgerufen am 02.02.2023).

bussgeldkatalog.org: Schadstoffklasse von Lkw feststellen: So geht's!, in: bussgeldkatalog.org, 18.05.2023, [online] <https://www.bussgeldkatalog.org/schadstoffklasse-lkw/> (abgerufen am 15.06.2023).

China Kunststoff-Formteile | 15 Jahre Qualitätsspritzguss: 08.12.2022, [online] <https://de.mxmparts.com/plastic-molded-parts/> (abgerufen am 29.03.2023).

Clausen, Uwe/Christiane Geiger: Verkehrs- und Transportlogistik, in: Springer eBooks, 01.01.2013, [online] doi:10.1007/978-3-540-34299-1.

Dispan, Jürgen/Laura Mender: Branchenanalyse kunststoffverarbeitende Industrie 2020. Beschäftigungstrends, Kreislaufwirtschaft, digitale Transformation, in: Hans-Böckler-Stiftung, Nr. 186, 01.01.2020, [online] [https://www.econstor.eu/bitstream/10419/218942/1/2020-05%20KVI-HBS-WP\\_186\\_2020.pdf](https://www.econstor.eu/bitstream/10419/218942/1/2020-05%20KVI-HBS-WP_186_2020.pdf).

Fahimnia, Behnam/Michael G.H. Bell/David A. Hensher/Joseph Sarkis: Green Logistics and Transportation: A Sustainable Supply Chain Perspective, Springer, 11.05.2015.

Franchetti, Matthew John/Defne Apul: Carbon Footprint Analysis: Concepts, Methods, Implementation, and Case Studies, CRC Press, 18.06.2012, S. 59-63.

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML: Klimaschutz in Logistik und Verkehr - Fraunhofer IML, in: Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, 2022, [online] [https://www.ima.fraunhofer.de/de/abteilungen/b3/umwelt\\_ressourcenlogistik/dienstleistungen/umwelt\\_und\\_ressourcen/klimaschutz.html](https://www.ima.fraunhofer.de/de/abteilungen/b3/umwelt_ressourcenlogistik/dienstleistungen/umwelt_und_ressourcen/klimaschutz.html) (abgerufen am 22.11.2022).

Large, Rudolf O.: Logistikfunktionen, in: Oldenbourg Wissenschaftsverlag eBooks, 18.04.2012, [online] doi:10.1524/9783486715866, S. 61-63.

Meisel, Frank: Emissionsorientierte Transportlogistik, in: De Gruyter eBooks, 25.06.2018, [online] doi:10.1515/9783110473803-057, S. 1153–1163.

Rollawaycontainer: Leichte Kunststoffpalette 800 x 1200 mm, in: Rollawaycontainer, 2023, [online] [https://www.rollawaycontainer.de/leichte-kunststoffpalette-800-1200.html?gclid=CjwKCAjwov6hBhBsEiwAvrvN6KjKasxuJvkLm7kxpS8Zd5oK0eA-orMhaYtbj-NIOILu6WUCA5ZpRoC2W8QAvD\\_BwE](https://www.rollawaycontainer.de/leichte-kunststoffpalette-800-1200.html?gclid=CjwKCAjwov6hBhBsEiwAvrvN6KjKasxuJvkLm7kxpS8Zd5oK0eA-orMhaYtbj-NIOILu6WUCA5ZpRoC2W8QAvD_BwE) (abgerufen am 19.04.2023).

Schiffer, Hans-Wilhelm: Treibhausgasneutralität 2045/2050: Verschärfung der nationalen und der europäischen Klimaziele, in: Wirtschaftsdienst, Springer Science+Business Media, Bd. 101, Nr. 8, 01.08.2021, [online] doi:10.1007/s10273-021-2982-6, S. 638–644.

Schmied, Martin/Wolfram Knörr: Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258 (2. Aufl.), 2. Aufl., Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V., 2013, [online] [http://178.63.40.151/dslv/web.nsf/gfx/8F102DF8C3E4A2F141257BB7007779CB/\\$file/DSLVL-Leitfaden%20Berechnung%20von%20THG-Emissionen%20Stand%2003-2013.pdf](http://178.63.40.151/dslv/web.nsf/gfx/8F102DF8C3E4A2F141257BB7007779CB/$file/DSLVL-Leitfaden%20Berechnung%20von%20THG-Emissionen%20Stand%2003-2013.pdf).

Settele GmbH & Co. KG.: Home, in: settele.de, o. D., [online] <https://www.settele.de/> (abgerufen am 13.04.2023).

Statistisches Bundesamt: Beförderungsmenge und Beförderungsleistung nach Verkehrsträgern, in: Statistisches Bundesamt, 17.10.2022, [online] <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Tabellen/gueterbefoerderung-lr.html> (abgerufen am 30.11.2022).

Umweltbundesamt: Emissionsdaten, in: Umweltbundesamt, 02.07.2023, [online] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten> (abgerufen am 19.12.2022).

Umweltbundesamt: Güterverkehr, in: Umweltbundesamt, 13.09.2019, [online] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/nachhaltige-mobilitaet/gueterverkehr> (abgerufen am 06.12.2022).

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC): Climate Neutral Now Guidelines for Participation, UNFCCC, o. D., [online] <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/CNN%20Guidelines.pdf>

Wittenbrink, Paul: Green Logistics: Konzept, aktuelle Entwicklungen und Handlungsfelder zur Emissionsreduktion im Transportbereich, Springer-Verlag, 21.08.2015, S.1-22.

World Economic Forum: Net-Zero Challenge: The supply chain opportunity, 01.2021, S. 6-7, [online]

[https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Net\\_Zero\\_Challenge\\_The\\_Supply\\_Chain\\_Opportunity\\_2021.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Net_Zero_Challenge_The_Supply_Chain_Opportunity_2021.pdf).

## Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Abschlussarbeit selbständig angefertigt, nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe und die Überprüfung mittels Anti-Plagiatssoftware dulde.

Augsburg, 01.06.2023

Ort, Datum

Memo Ullrich

Unterschrift