

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

- Diplomarbeit -

Entwicklung von Key Performance Indicators zur Senkung des CO₂-Ausstoßes entlang einer Supply Chain im Bereich der Lebensmittelindustrie

vorgelegt von
Michael Spiess

Matrikelnummer: 102535
Studiengang: Wirtschaftsingenieurwesen

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

Ausgegeben am: 12.08.2013

Eingereicht am: 19.12.2013

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abkürzungsverzeichnis | IV |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Grundlagen zur Erfassung von THG-Emissionen | 4 |
| 2.1 Grundbegriffe zum Thema Klima | 4 |
| 2.1.1 Das Klimasystem | 4 |
| 2.1.2 Der menschliche Einfluss auf das Klimasystem | 6 |
| 2.1.3 Das Kohlendioxid-Äquivalent von THG | 7 |
| 2.2 Erfassung auf Länderebene | 9 |
| 2.2.1 Die UNFCCC und das Kyoto-Protokoll | 9 |
| 2.2.2 Aktuelle Entwicklungen im Klimaschutz | 11 |
| 2.3 Erfassung auf Unternehmensebene | 11 |
| 2.3.1 Die Nachhaltigkeit von Unternehmen | 12 |
| 2.3.2 Standards zur Dokumentation der Nachhaltigkeit | 12 |
| 2.4 Erfassung für Produkte und Dienstleistungen | 14 |
| 2.4.1 Das Life Cycle Assessment (LCA) | 14 |
| 2.4.2 Der Product Carbon Footprint (PCF) | 15 |
| 2.4.3 Abgrenzung von LCA und PCF | 18 |
| 3 Herleitung von KPI-Kriterien | 20 |
| 3.1 Kennzahlen | 20 |
| 3.1.1 Eigenschaften von Kennzahlen | 22 |
| 3.1.2 Klassifizierung von Kennzahlen | 22 |
| 3.2 Key Performance Indicators | 23 |
| 3.3 KPI-Kriterien | 24 |
| 4 Definition der Systemgrenzen | 26 |
| 4.1 Definition der Logistik | 26 |
| 4.2 Definition der Distributionslogistik | 27 |
| 4.3 Eingrenzung der Distributionslogistik für diese Arbeit | 28 |
| 5 Grundlagen zur Berechnung von THG-Emissionen | 30 |
| 5.1 Die Grundformel der Emissionsberechnung | 30 |
| 5.2 Ermittlung der Umrechnungsfaktoren | 30 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.2.1 | Übersicht über die Datenquellen | 30 |
| 5.2.2 | Kraftstoffe für Motoren | 31 |
| 5.2.3 | Elektrischer Strom | 33 |
| 5.2.4 | Wärmeerzeugung | 36 |
| 5.2.5 | Kältemittel | 36 |
| 5.3 | Ermittlung des Energieverbrauchs im Straßenverkehr | 37 |
| 5.3.1 | Grundlagen der Fahrzeugphysik | 37 |
| 5.3.2 | Ermittlung des Energieverbrauchs ohne Detailkenntnisse | 39 |
| 5.3.3 | Ermittlung des Energieverbrauchs mit Detailkenntnissen | 40 |
| 5.3.4 | Ermittlung des Energieverbrauchs bei LKW-Kühltransporten | 41 |
| 5.4 | Ermittlung des Energieverbrauchs der Lagerung | 43 |
| 5.4.1 | Der Kältebedarf | 44 |
| 5.4.2 | Strom und Wärme | 47 |
| 6 | Aufschlüsselung der THG-Parameter | 48 |
| 6.1 | Der Parameterbegriff | 48 |
| 6.2 | THG-Parameter aus den Systemgrenzen der Umrechnungsfaktoren | 49 |
| 6.3 | THG-Parameter des Transportprozesses in der Distributionslogistik | 49 |
| 6.3.1 | Herleitung der THG-Parameter | 50 |
| 6.3.2 | Zusammenfassung der THG-Parameter des Transportprozesses | 53 |
| 6.4 | THG-Parameter des Lagerprozesses in der Distributionslogistik | 54 |
| 7 | Entwicklung der KPI | 55 |
| 7.1 | Strukturierungssystematik | 55 |
| 7.2 | KPI des Transportprozesses | 55 |
| 7.2.1 | Der KPI Transporteffizienz | 56 |
| 7.2.2 | KPI der Beladungseffizienz | 57 |
| 7.2.3 | Beispiel | 61 |
| 7.2.4 | KPI der Energieeffizienz | 64 |
| 7.2.5 | KPI der Routeneffizienz | 66 |
| 7.3 | KPI des Lagerprozesses | 66 |
| 7.3.1 | Der KPI Lagereffizienz | 66 |
| 7.3.2 | KPI der THG-Effizienz | 67 |
| 7.3.3 | KPI der Kühleffizienz | 69 |
| 8 | Diskussion | 72 |
| 9 | Zusammenfassung und Ausblick | 74 |
| 9.1 | Zusammenfassung | 74 |
| 9.2 | Ausblick | 75 |

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| A Anhang | 77 |
| A.1 LCA-Produktsystem | 78 |
| A.2 LCA-Wirkungsabschätzung | 79 |
| A.3 PCF-Prozessnetz | 80 |
| A.4 Emissionsfaktoren BMU | 81 |
| A.5 Emissionsfaktoren mit Energievorkette | 82 |
| A.6 Emissionsfaktoren für Erdgas | 83 |
| A.7 Emissionsfaktoren für Kältemittel | 84 |
| A.8 Spezifischer Energieverbrauch von LKW | 85 |
| A.9 Beladung eines LKW - Einflüsse | 86 |
| A.10 Berechnungen zu Beispielszenario 1 | 87 |
| | |
| Literatur | 88 |
| | |
| Abbildungsverzeichnis | 97 |
| | |
| Tabellenverzeichnis | 99 |
| | |
| Erklärung | 100 |

Abkürzungsverzeichnis

BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

BSI British Standards Institution

CO₂-eq Kohlendioxid-Äquivalent

GEMIS Global Emission Model

GHG-Protokoll Greenhouse Gas Protocol

GRI Global Reporting Initiative

GWP Global Warming Potential

HBEFA Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs

IFEU Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

ISO International Organisation for Standardisation

KPI Key Performance Indicator

KWK Kraft-Wärme-Kopplung

LCA Life Cycle Assessment

Öko-Institut Institut für angewandte Ökologie

PCF Product Carbon Footprint

THG Treibhausgas

TREMOD Transport Emission Model

TTW Tank-to-Wheel

UNEP Umweltprogramm der Vereinten Nationen

UNFCCC United Nations Framework Convention on Climate Change

WBCSD World Business Council for Sustainable Development

WRI World Ressource Institution

WTW Well-to-Wheel

1. Einleitung

Der Klimawandel kann als eine „zentrale Herausforderung“ unserer Zeit bezeichnet werden, mit der sowohl die Industrie als auch die Gesellschaft konfrontiert sind [BMU12, S. 6]. Als Hauptverursacher der Veränderung des globalen Klimas wird von der Institution des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - gemeinhin als Weltklimarat bezeichnet - der anthropogene Strahlungsantrieb seit dem Jahr 1750 identifiziert [IPC13a, S. 1].

Dieser menschliche Einfluss auf das Klimasystem stößt überwiegend auf Akzeptanz und ist dauerhaft präsent in der gesellschaftlichen Diskussion. Dies bewirkt einen zunehmenden Druck zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels, dem auch der Bereich der Logistik ausgesetzt ist. Zum Einen ist eine Reaktion von Logistiksystemen auf direkte Auswirkungen der Erderwärmung gefragt, zum Anderen entstehen Formen des indirekten Anpassungsdrucks auf verschiedenen Ebenen [MK10].

Auf politischer Ebene wurden zur Verlangsamung und Milderung der Folgen der Erderwärmung seit der Gründung der Klimarahmenkonvention United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) viele Anstrengungen unternommen, verbindliche Klimaschutzziele für die teilnehmende Staatengemeinschaft zu vereinbaren [Kra11]. Ausgehend von dieser Entwicklung wird zum Beispiel in Deutschland aktuell eine Senkung der Emission von Treibhausgasen (THG) von 80 % gegenüber dem Niveau des Jahres 1990 angestrebt [BMU11].

Des Weiteren hat eine Sensibilisierung des Konsumenten bezüglich des individuellen Einflusses auf den Klimawandel stattgefunden, wodurch das Thema Nachhaltigkeit im täglichen Konsumverhalten an Bedeutung gewonnen hat [VI 11]. Aufgrund des wachsenden Kundenwunsches nach „grünen Produkten“ [RGF13, S. 1], und der Einbeziehung der „ökologischen Leistung“ [RD12, S. 1] eines Produktes in die Kaufentscheidung kann die Herstellung von klimafreundlichen Produkten und deren Deklaration als solche einen Wettbewerbsvorteil darstellen. Auch die Relevanz der Nachhaltigkeit in der Beziehung zwischen Kunde und Lieferant innerhalb einer Supply Chain kann zu einem Anpassungsdruck hinsichtlich der Klimafreundlichkeit in der Logistik führen [Hal00].

Eine Voraussetzung für die Umsetzung einer klimafreundlichen Produktion und Logistik, ist die Erfassung von produktbezogenen Klimabilanzen [BMU12]. In diesem Zusammenhang gewinnen Methoden zur Bilanzierung von Umwelteinflüssen wie das Life Cycle

1. Einleitung

Assessment (LCA) oder der Product Carbon Footprint (PCF) an Bedeutung. Letzterer kann einerseits zur Deklaration der Klimafreundlichkeit von Produkten dienen. Andererseits kann er, als Werkzeug eingesetzt, dazu beitragen, „die komplexen Wertschöpfungsnetze hinsichtlich der THG-Emissionen zu optimieren“[PCF13] und auf diese Weise THG-Emissionen, die auf ein Produkt zurückzuführen sind, zu senken [Kra11].

Allerdings ist die Berechnung und Verwendung des PCF mit Problemen verbunden. Es existieren keine „weitreichend anerkannten“ internationalen Berechnungsstandards [Kra11, S. 43]. Deutsche Unternehmen orientieren sich meist an den Normen zur Ökobilanzierung (DIN EN ISO 14040/ 14044), wohingegen britische Unternehmen meist die Spezifikation PAS 2050 nutzen. Auch die Ausrichtung der Bilanzierung auf die THG-Effektivität eines Produktes, weist nicht unmittelbar auf Verbesserungspotentiale bzgl. der THG-Effizienz der eingesetzten Prozesse hin. Außerdem kann es durch das Setzen unterschiedlicher Systemgrenzen und einer hohen Komplexität von Supply Chains zu einer mangelnden Aussagekraft und Vergleichbarkeit des berechneten PCF kommen [Kra11].

Somit kann die Eignung eines Bilanzierungsansatzes wie dem PCF in Frage gestellt werden, als Grundlage für zukunftsbezogene Entscheidungen und die Ableitung konkreter Maßnahmen zur Senkung von THG-Emissionen in der Logistik zu dienen. In diesen Kontext kann auch die noch geringe Bedeutung des PCF als Kennzahl in der Praxis eingeordnet werden. In einer Studie der J+M Management und Consulting AG und Logistik Heute gegeben nur 30 % der befragten Unternehmen an, dass der PCF eine relevante Kennzahl für ihre Lieferkette darstellt [Log13].

In dieser Arbeit wird daher eine differenziertere Betrachtung von Faktoren, die die Emission von THG entlang des Produktlebenszyklusses beeinflussen, vorgenommen. Dies geschieht im konzeptionellen Zusammenhang mit dem durch die Europäische Kommission geförderten Projekt „e-SAVE“, im Rahmen dessen eine Daten-Infrastruktur entwickelt wird, durch die die THG-Emissionen, die entlang einer Supply Chain verursacht werden, abgebildet werden können. Diese Struktur beinhaltet ein Datenmodell, das als Grundlage für Simulationen verwendet werden kann. In diesem Datenmodell werden Informationen über die Struktur der Supply Chain und die durch ein Monitoring System erhobenen Daten abgebildet. [eSA13]

Die Zielstellung dieser Arbeit ist die Aufschlüsselung der THG-Parameter innerhalb der Distributionslogistik im Lebensmittelsektor. Ausgehend von diesen Parametern sollen dann KPI zur Senkung von THG-Emissionen entwickelt werden, die auf die THG-Effizienz der betrachteten Logistikprozesse abzielen. Vor der eigentlichen Analyse soll das System der Distributionslogistik eingegrenzt, d.h. die in dieser Arbeit betrachteten Logistikprozesse definiert werden.

Vorgehensweise

Um einen konzeptionellen Bezugsrahmen hinsichtlich der Erfassung von THG herzustellen, werden in Kapitel 2 wichtige Zusammenhänge über den menschlichen Einfluss auf das Klimasystem der Erde erläutert und die Konsequenzen dieses Einflusses heruntergebrochen auf die Ebenen von Ländern und Regionen, Unternehmen, sowie Produkten bzw. Dienstleistungen. Damit sind sowohl politische Konsequenzen, wichtige Standards zur Erfassung von THG, als auch die etablierten Methoden zur Bilanzierung von Umwelteinflüssen im Allgemeinen als auch von THG im Speziellen gemeint.

Im Anschluss daran erfolgt in Kapitel 3 auf Seite 20 eine Eingrenzung der Begriffe Kennzahl und Key Performance Indicator (KPI). Um im weiteren Verlauf der Arbeit die THG-Parameter in der Distributionslogistik aufzuschlüsseln und aus ihnen KPI entwickeln zu können, wird nach dieser Eingrenzung eine KPI-Definition in Form eines Kriterienkataloges für diese Arbeit abgeleitet.

In Kapitel 4 auf Seite 26 werden die Systemgrenzen dieser Arbeit definiert. Ziel hierbei ist eine Bestimmung der im weiteren Verlauf der Arbeit betrachteten Logistikprozesse. Dazu werden im Vorfeld die Begriffe Logistik und der Teilbereich der Distributionslogistik voneinander abgegrenzt. Bei der Definition der Systemgrenzen spielt unter anderem auch der betrachtete Bereich des Lebensmittelsektors eine Rolle.

Nachdem die genaue Eingrenzung der in dieser Arbeit betrachteten Logistikprozesse erfolgt ist, wird in Kapitel Kapitel 5 auf Seite 30 der aktuelle Stand der Technik zur Berechnung von THG-Emissionen vorgestellt. Dabei wird sowohl auf aktuelle Normen und Standards, als auch auf physikalische Grundlagen zurückgegriffen. Ziel ist es eine Informationsgrundlage über die Einflussfaktoren auf die Emission von THG zur späteren Aufschlüsselung der THG-Parameter und Entwicklung der KPI zu schaffen.

Die Aufschlüsselung der THG-Parameter erfolgt in Kapitel 6 auf Seite 48 der Arbeit. Dazu werden die Einflussgrößen aus dem vorherigen Kapitel kategorisiert und strukturiert dargestellt. Dabei werden diejenigen Einflussgrößen verwendet, die als THG-Parameter in die Entwicklung der KPI eingehen.

In Kapitel 7 auf Seite 55 werden aus den identifizierten THG-Parametern KPI gebildet. Dabei wird besonders zur Begründung der Relevanz einzelner Größen weitere Literatur herangezogen. Die KPI werden nach verschiedenen Effizienz kategorien geordnet und in einer strukturierten Form dargestellt, aus der neben der KPI-Definition auch der jeweilige Handlungsauftrag hervorgeht.

Kapitel 8 auf Seite 72 beinhaltet eine Diskussion der Vorgehensweise und Ergebnisse dieser Arbeit, schließlich erfolgt in Kapitel 9 auf Seite 74 eine kurze Zusammenfassung und ein Ausblick auf mögliche Anknüpfungspunkte dieser Arbeit hinsichtlich weiterer Untersuchungen.

2. Grundlagen zur Erfassung von THG-Emissionen

In diesem Kapitel werden allgemeine theoretische Grundlagen zur Erfassung von THG-Emissionen vorgestellt, um den konzeptionellen Bezugsrahmen der Thematik des Klimawandels zu erläutern. Dazu werden wichtige Begriffe definiert, die im Zusammenhang mit dem Klimawandel stehen und die wichtigsten Standards und Bilanzierungsmethoden zur Erfassung von THG beschrieben.

2.1. Grundbegriffe zum Thema Klima

Der Motivation dieser Arbeit liegt der menschliche Einfluss auf das Klimasystem der Erde zu Grunde. Deshalb werden in diesem Abschnitt wichtige Begriffe zum Thema Klima definiert und die physikalischen Grundlagen bzgl. dieses menschlichen Einflusses erläutert.

2.1.1. Das Klimasystem

Die Begriffe Wetter und Klima werden im alltäglichen Sprachgebrauch oft synonym benutzt. Mit dem Begriff Wetter wird gemeinhin der sich verändernde Zustand der Atmosphäre, die den Menschen umgibt, bezeichnet. Das Wetter kann charakterisiert werden durch die Umgebungstemperatur, Niederschlag, Wind und weitere Elemente. In Abgrenzung dazu wird das Klima oft als „durchschnittliches Wetter“ oder genauer, als die statistische Beschreibung hinsichtlich der Bedeutung und Variabilität von für das Wetter relevanten Größen über einen bestimmten Zeitraum, definiert [IPC07, S. 96]. Der Betrachtungszeitraum beträgt dabei in der Regel 30 Jahre [Wor13].

Die Betrachtung des Klimas erfolgt meist in einer systemanalytischen Betrachtung in Form des sogenannten Klimasystems. Dabei handelt es sich um ein komplexes, dynamisches System, welches aus verschiedenen Komponenten besteht, die in Wechselwirkung zueinander stehen [Hou01]. Eine schematische Übersicht über die Struktur dieses Systems wird in Abbildung 2.1 auf Seite 6 gegeben. Die fünf Hauptkomponenten werden im Folgenden beschrieben [Hou01, 97 ff]:

- Die Atmosphäre stellt den instabilsten Teil des Klimasystems dar, wobei ihre Zu-

2. Grundlagen zur Erfassung von THG-Emissionen

sammensetzung starke Auswirkungen auf die Entwicklung des Klimas hat. Sie besteht hauptsächlich aus Stickstoff (ca. 78 % Anteil), Sauerstoff (ca. 21 % Anteil) und Argon (ca. 1 % Anteil). Diese Gase weisen nur eine geringe Wechselwirkung mit der eingehenden Sonnenstrahlung auf. Weitere Bestandteile sind zwar nur in einem geringeren Maße in der Atmosphäre enthalten, wechselwirken aber weitaus stärker mit der eingehenden Sonnenstrahlung. Dazu zählen zum Beispiel Kohlendioxid, Lachgas, Ozon und Wasserdampf. Ein solches Gas wird auch Treibhausgas (THG) genannt.

- Die Hydrosphäre besteht aus der Gesamtheit des Wassers auf der Erde, wobei die Ozeane mit einem Anteil von ca 70 % die größte Bedeutung haben. Sie speichern eine große Menge an Kohlendioxid;
- Die Kryosphäre umfasst alle Bereiche der Oberfläche der Erde, die mit Eis bedeckt sind. Hervorzuheben im Kontext dieser Arbeit ist die hohe Reflektivität der eingehenden Sonnenstrahlung von dieser Sphäre.
- Die Biosphäre beinhaltet die Bereiche biologischen Lebens. Der Einfluss dieser Sphäre auf das Klimasystem ist z.B. durch die vom Prozess der Photosynthese ausgehende Speicherung von Kohlenstoff durch Pflanzen gegeben;
- Die Landfläche hat große Auswirkungen auf die Absorption und Reflektion der Energie eingehender Sonnenstrahlung. Auch auf der Landfläche stattfindende Verdunstungsprozesse wirken sich auf die Temperatur nahe der Erdoberfläche aus.

Jede Veränderung der Komponenten des Klimasystems und ihrer Wechselwirkungen untereinander, egal ob sie natürlichen Ursprungs ist oder durch den Menschen ausgelöst wird, kann zu Veränderungen des Klimas führen. Für ein stabiles Klima ist eine ausgeglichene Energiebilanz des Klimasystems erforderlich. Das bedeutet, dass sich die Sonneneinstrahlung, als größte externe Energiequelle, die auf das Klimasystem einwirkt, und die vom System nach außen emittierte Energie in einem Gleichgewicht befinden. Eine schematische Darstellung einer ausgeglichenen Energiebilanz über einen längeren Zeitraum betrachtet ist in Abbildung 2.2 auf Seite 7 zu sehen. Etwa die Hälfte der eingehenden Sonnenstrahlung wird auf der Erdoberfläche absorbiert. Diese Energie wird in Form von Wärme (Thermals), Verdunstung (Evatranspiration) und durch Langwellenstrahlung (Longwave Radiation), die durch Wolken und THG absorbiert wird, in die Atmosphäre abgegeben. Außerdem wird im Gegenzug Strahlung durch die Atmosphäre sowohl zurück zur Erdoberfläche als auch nach außen hin emittiert. Das bedeutet, dass Teile der Sonneneinstrahlung die Atmosphäre passieren, dann aber durch Wolken und Moleküle wie THG und Aerosolen zurück zur Erde gelangen und auf diese Weise die Erdoberfläche erwärmt wird. Dieser Vorgang wird Treibhauseffekt genannt. [IPC07]

2. Grundlagen zur Erfassung von THG-Emissionen

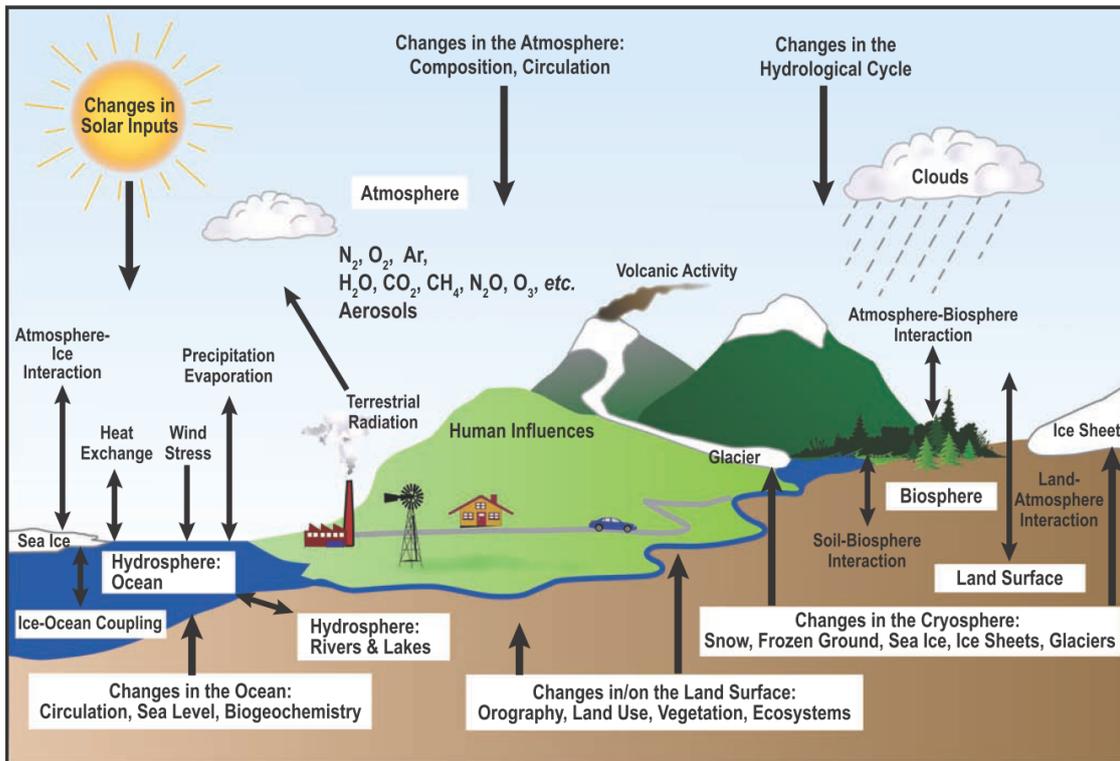


Abb. 2.1.: Schematische Darstellung der Komponenten des Klimasystems [IPC07, S. 104]

2.1.2. Der menschliche Einfluss auf das Klimasystem

Dem menschlichen Einfluss auf das Klimasystem wird durch den positiven anthropogenen Strahlungsantrieb und der damit einhergehenden Veränderung der Energiebilanz des Klimasystems eine große Bedeutung zugeschrieben [IPC13a]. Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte des menschlichen Verhaltens aufgeführt, die zu dieser Veränderung führen [IPC07, 92ff]:

- Die Zusammensetzung der Atmosphäre wurde gerade seit der Industriellen Revolution stark durch den Menschen beeinflusst. So stieg der Anteil von Kohlendioxid in der Atmosphäre bis heute um ca. 30 % im Vergleich zur vorindustriellen Zeit, vor allem wegen der Verbrennung fossiler Energieträger. Außerdem erhöhte sich der Anteil weiterer Gase in der Atmosphäre, die sich auf die Energiebilanz des Klimasystems auswirken. Dazu zählen Methan und Lachgas als Folge von agrarkulturellen oder industriellen Aktivitäten. Außerdem kam es zu einem Anstieg von Kohlenmonoxid und Stickoxiden, die zwar keine THG sind, jedoch einen Anstieg des Ozonanteils innerhalb der Troposphäre zur Folge haben. Des Weiteren sind heute Verbindungen in der Atmosphäre zu finden, die auf natürlichem Wege nicht vorkommen, wie zum Beispiel Fluorchlorkohlenwasserstoffe. Diese bauen die Ozonschicht innerhalb der Stratosphäre ab und sind in ihrer Wirkung starke THG.

2. Grundlagen zur Erfassung von THG-Emissionen

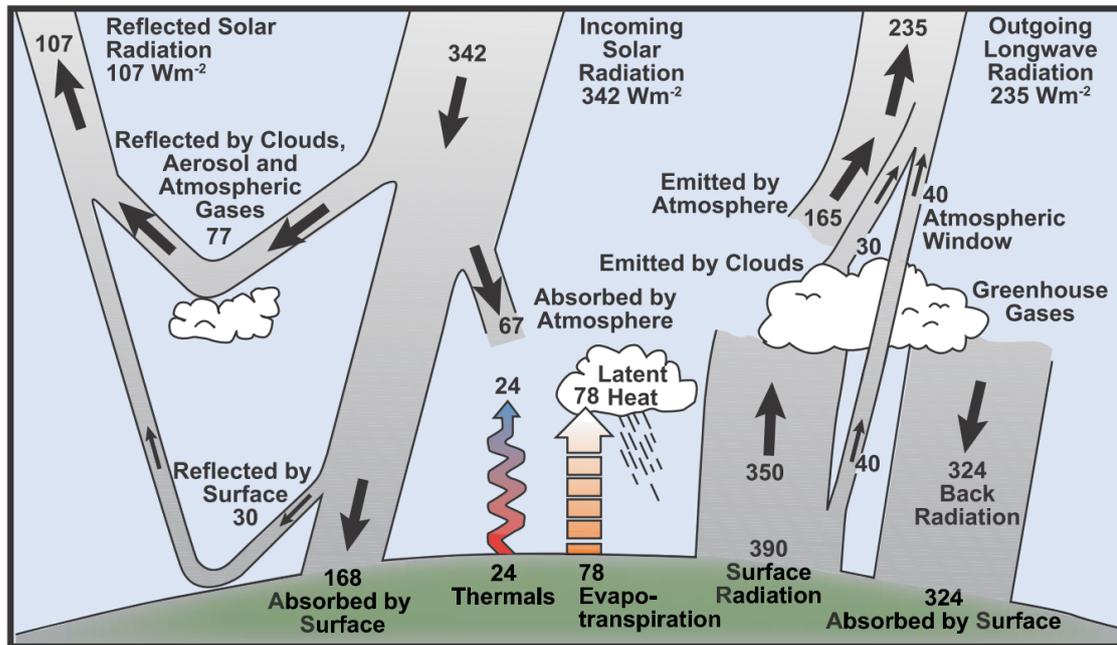


Abb. 2.2.: Schematische Darstellung einer ausgeglichenen Energiebilanz des Klimasystems [IPC07, S. 96]

- Durch die durch den Menschen verursachte Veränderung der Zusammensetzung der Atmosphäre kommt es zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes. Das ist darin begründet, dass die höhere Konzentration von THG zu einer erhöhten Absorption von Infrarotstrahlung führt, die von der Erde aus reflektiert wird.
- Unter Anderem industrielle Aktivitäten führen zu einer Emission von festen oder flüssigen Schwebeteilchen, den sogenannten Aerosolen, in die Atmosphäre, wie z.B. Sulfate oder Nitrate. Einerseits kann sich daraus eine direkte Reflektion der Sonneneinstrahlung und damit ein negativer Strahlungsantrieb ergeben. Andererseits absorbieren bestimmte Aerosole wie Ruß die Sonneneinstrahlung und bewirken damit zunächst einen lokal begrenzten Temperaturanstieg in der Atmosphäre.

2.1.3. Das Kohlendioxid-Äquivalent von THG

Um verschiedene THG hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Treibhauseffekt beurteilen zu können, bedarf es einer Metrik, die einen Vergleich verschiedener THG ermöglicht. Häufig wird dazu Kohlendioxid als Referenz-THG herangezogen, wobei der Referenzwert an Kohlendioxid-Emissionen zu einem anderen THG als Kohlendioxid-Äquivalent ($\text{CO}_2\text{-eq}$) bezeichnet wird. [IPC13b]

Die Berechnung des $\text{CO}_2\text{-eq}$ eines THG erfolgt über einen Umrechnungsfaktor. Ein möglicher Faktor ist das Global Warming Potential (GWP). Diese Maßzahl bezeichnet den Strahlungsantrieb einer chemischen Verbindung bezogen auf einen definierten Zeitraum.

2. Grundlagen zur Erfassung von THG-Emissionen

Der Strahlungsantrieb wurde vom IPCC als die Veränderung der Netto-Strahlenflussdichte in der Tropopause definiert. Er wird in Watt pro Quadratmeter angegeben und kann durch eine Veränderung der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre zu Stande kommen. Nach dem IPCC wird bei der Berechnung ein Zustand in der Atmosphäre angenommen, nachdem sich die Temperaturen innerhalb der Stratosphäre (oberhalb der Tropopause) an eine veränderte Konzentration von Treibhausgasen angepasst haben, wohingegen sich die Temperatur innerhalb der Troposphäre (unterhalb der Tropopause) auf dem Niveau von vor der Veränderung der Netto-Strahlenflussdichte in der Tropopause befindet. Diese Annahme wird „stratospheric adjustment“ genannt und ist schematisch in Abbildung 2.3 dargestellt. [Hou01, S. 353]

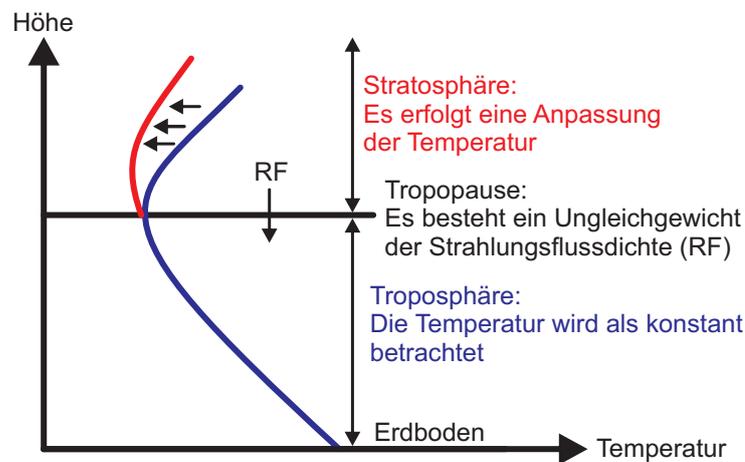


Abb. 2.3.: Schematische Darstellung des „stratospheric-adjustment“ nach [IPC07, S. 134]

Die Formel zur Berechnung des GWP eines THG lautet [IPC07, S. 210]:

$$GWP_i = \frac{\int_0^{ZR} RF_i(t) dt}{\int_0^{ZR} RF_r(t) dt}$$

i = THG zu dem der GWP berechnet werden soll

r = Referenz-THG

ZR = Zeitraum

RF = Strahlungsantrieb (in W/m^2)

2. Grundlagen zur Erfassung von THG-Emissionen

Für das Referenz-THG wird demnach ein GWP von 1 berechnet, da in diesem Fall $RF_i(t)$ gleich $RF_r(t)$ ist. In Tabelle 2.1 sind beispielhaft Werte für das GWP verschiedener THG abgebildet bezogen auf das Referenz-THG Kohlendioxid. Demnach entspricht z.B. ein Kilogramm emittiertes Methan 25 kg CO₂-eq.

| Treibhausgas | Formel | GWP | | |
|---------------------|--------------------|----------|-----------|-----------|
| | | 20 Jahre | 100 Jahre | 500 Jahre |
| Kohlendioxid | CO ₂ | 1 | 1 | 1 |
| Methan | CH ₄ | 72 | 25 | 7,6 |
| Lachgas | N ₂ O | 289 | 298 | 153 |
| Methylbromid | CH ₃ Br | 17 | 5 | 1 |
| Trichlorfluormethan | CCl ₃ F | 6730 | 4750 | 1620 |

Tab. 2.1.: GWP verschiedener THG aus [IPC07, S. 33]

2.2. Erfassung auf Länderebene

Zur Verlangsamung und Milderung der Folgen der Erderwärmung gibt es in der nationalen und internationalen Politik vieler Staaten das Bestreben nach einer Reglementierung des Ausstoßes von THG. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Institutionen und Übereinkommen dazu vorgestellt.

2.2.1. Die UNFCCC und das Kyoto-Protokoll

Im Jahr 1992 wurde im Rahmen der ersten Weltklimakonferenz im Jahr 1992 in Rio de Janeiro die UNFCCC definiert [Kra11]. Bis heute haben 195 Staaten diese Vereinbarung ratifiziert und werden in diesem Zusammenhang Parteien der UNFCCC genannt [UNF13]. Das konkrete Ziel der Vereinbarung ist es,

„(...) die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird.“ [IPC07, S. 97]

Zusätzlich wird angestrebt ein solches Niveau innerhalb eines definierten Zeitfensters sicherzustellen, sodass sich bestehende Ökosysteme nachhaltig an die Veränderung des globalen Klimas anpassen können [IPC07].

Ausgehend von der UNFCCC kam es zu weiteren Vereinbarungen und der Festlegung von konkreten Zielen zur Begrenzung der THG-Emissionen auf Länderebene. Dazu gehört unter anderem das Kyoto-Protokoll, welches auf der Weltklimakonferenz des Jahres 1997

2. Grundlagen zur Erfassung von THG-Emissionen

in Kyoto beschlossen wurde und in dem erstmals verbindliche Reduzierungsziele für die Parteien der UNFCCC festgelegt wurden. [Kra11]

Um eine Informationsgrundlage über den Stand der ausgestoßenen THG zu erhalten, haben sich die Annex I-Parteien der UNFCCC verpflichtet, jährlich die THG-Emissionen ihres Landes zu übermitteln [Kra11]. Zu diesen Ländern gehören die 41 wichtigsten Industriestaaten (z.B. aus EU, EFTA, USA, Japan) und einige Schwellenländer (z.B. Russland, Ukraine) [Kra11]. Diese Berichte werden „Inventarberichte“ genannt und beinhalten unter anderem die Quellen und Senken der THG, die im Kyoto-Protokoll explizit aufgeführt und oft auch als „Kyoto-Treibhausgase“ bezeichnet werden [Kra11, S. 31]. In diesem Zusammenhang bezeichnet eine Quelle den Sektor der Entstehung von THG und eine Senke den Sektor des Abbaus von THG. Die im Protokoll explizit aufgeführten Hauptsektoren (z.B. Energie, Produktionsprozesse, Landwirtschaft) können in weitere Untersektoren gegliedert werden, wobei z.B. der Untersektor Verkehr dem Hauptsektor Energie zugeordnet wird [BMU97]. Die Kyoto-THG laut Anlage A des Kyotoprotokolls werden im Folgenden aufgezählt [BMU97]:

- Kohlendioxid (CO_2),
- Methan (CH_4),
- Distickstoffoxid (N_2O),
- Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC),
- Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC) und
- Schwefelhexafluorid (SF_6)

Neben diesen existieren weitere gasförmige Verbindungen, die für den Treibhauseffekt verantwortlich, aber nicht im Kyoto-Protokoll enthalten sind. Einige von ihnen wurden bereits vorher durch das Montreal-Protokoll reglementiert, das bereits 1989 im Rahmen des Abkommens Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) als internationales Abkommen zum Schutz der Ozonschicht in Kraft trat. Die 194 Staaten, welche das Montreal-Protokoll bis heute ratifiziert haben verpflichten sich darin zur Reduzierung und im weiteren Verlauf zur vollständigen Unterbindung von Emissionen, welche die Ozonschicht innerhalb der Stratosphäre zerstören. Nach einer aktuellen Studie ist es wahrscheinlich, dass die Reduzierungsverpflichtung des Montreal-Protokolls maßgeblich zu einer Verlangsamung der Erderwärmung seit den 1990er Jahren beigetragen hat [EPM13]. Zu den THG des Montreal-Protokolls zählen [UNE12]:

- Fluorkohlenwasserstoffe (FCKW),
- Halone,
- Tetrachlorkohlenstoff (CCl_4),

2. Grundlagen zur Erfassung von THG-Emissionen

- Methylchloroform ($C_2H_3Cl_3$),
- Teilhalogenierte Fluorbromkohlenwasserstoffe,
- Methylbromid (CH_3Br) und
- Bromchlormethan (CH_2BrCl).

Als „indirekte Treibhausgase“ [BMU13] werden diejenigen Luftemissionen bezeichnet, die keinen direkten Einfluss auf den Treibhauseffekt haben, jedoch die Bildung von anderen THG beeinflussen. Sind sind Teil der Berichtspflicht an die UNFCCC und umfassen laut dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) [BMU13]:

- Schwefeldioxid (SO_2),
- Stickoxide (NO_x),
- flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC) und
- Kohlenmonoxid (CO).

Bei der Berechnung der THG im Rahmen der Inventarberichterstattung der THG einzelner Länder sind einige Richtlinien zu beachten, auf die innerhalb des Kyoto-Protokolls verwiesen wird [BMU97]. Dabei handelt es sich zum Beispiel um die Richtlinien „Guidelines for national systems for the estimation of anthropogenic greenhouse gas emissions by sources and removals by sinks“ [UNF05, S. 15] und „Good practice guidance and adjustments“ [UNF05, S. 21]. Außerdem ist es eine Vorgabe des Kyoto-Protokolls, die Kyoto-THG in CO_2 -eq auszuweisen [BMU97, S. 3].

2.2.2. Aktuelle Entwicklungen im Klimaschutz

Da das Kyoto-Protokoll im Jahr 2012 ausgelaufen ist, ist die Aushandlung eines Nachfolgeprotokolls Gegenstand der aktuellen Klimapolitik, insbesondere auf der Weltklimakonferenz in Warschau diesen Jahres. Darüber hinaus wurde in der EU im Jahr 2008 ein Emissionsminderungsziel von 20 % gegenüber dem Niveau von 1990 festgelegt [Kra11]. Unabhängig davon setzten sich einzelne Staaten ambitioniertere Ziele, wie z.B. Deutschland, das eine Senkung der THG-Emissionen gegenüber dem Niveau von 1990 um 80 % bis zum Jahr 2050 vorsieht (ausgehend vom „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“. [BMU11])

2.3. Erfassung auf Unternehmensebene

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen zur Erfassung von THG auf Unternehmensebene dargestellt.

2.3.1. Die Nachhaltigkeit von Unternehmen

In den 1990er Jahren begannen vor allem börsennotierte Unternehmen mit der Veröffentlichung von Umweltbilanzen. Diese dienten vor Allem dem Zweck Unternehmensbereiche zu identifizieren, in denen sich Emissionsminderungsmaßnahmen besonders rentieren. In der jüngeren Vergangenheit fand eine Weiterentwicklung dieser Umweltbilanzen zu umfangreichen Nachhaltigkeitsberichten statt. [Kra11; Cla+01]

In diesem Zusammenhang sind für den Begriff der Nachhaltigkeit unterschiedliche Definitionen zu finden. Die Definition des „Sustainable Development“ aus dem Brundtland-Bericht der UN Kommission für Umwelt und Entwicklung aus dem Jahr 1987, ist eine sehr weit verbreitete für den Begriff. Dort wird eine Nachhaltige Entwicklung definiert als

„Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu verhindern, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können.“[UN87]

Aus dieser allgemein gehaltenen Definition des Begriffes der Nachhaltigkeit, lässt sich ein Rückschluss auf den Inhalt von Nachhaltigkeitsberichten ziehen. Diese beinhalten in der Regel neben dem Thema Umwelt auch die Aspekte des Sozialen und der Ökonomie [Cla+01], wobei der Bereich „Treibhausgasemissionen und Klimaschutz“ ein fester Bestandteil in fast jedem Nachhaltigkeitsbericht ist [Kra11, S. 37].

Die Motivation für Unternehmen Nachhaltigkeitsberichte zu verfassen ist vielschichtig. Ein Ziel ist die Stärkung der Reputation des Unternehmens und der unternehmenseigenen Marken beim Kunden [Kra11]. Auf der anderen Seite wächst aber auch das Interesse anderer Stakeholder, wie zum Beispiel Lieferanten und Mitarbeitern, mehr über die soziale und ökologische Dimension der Unternehmenstätigkeiten zu erfahren [Cla+01; Wer05].

2.3.2. Standards zur Dokumentation der Nachhaltigkeit

Um den verschiedenen Stakeholdern bzw. Rezipienten vergleichbare Standards für Nachhaltigkeitsberichte zur Verfügung zu stellen, wurde 1997 die Global Reporting Initiative (GRI) gegründet, die durch das UNEP gefördert wird [Wer05]. Aus ihr sind in ständigem Austausch mit verschiedenen internationalen Stakeholdern Richtlinien für die Nachhaltigkeitsberichterstattung hervorgegangen. Die Richtlinie G3 aus dem Jahr 2006 beinhaltet unter Anderem eine Aufzählung von ökologischen Leistungsindikatoren. In diesem Zusammenhang wird im Teil EN16 und EN17 der Richtlinie bezüglich der Emission von THG zwischen verschiedenen Kategorien unterschieden: den direkten, indirekten und sonstigen THG-Emissionen [Glo06].

Diese Kategorien gehen auf das Greenhouse Gas Protocol (GHG-Protokoll) zurück, auf das explizit zur genauen Ermittlung von THG-Emissionen im GRI-Leitfaden verwiesen

2. Grundlagen zur Erfassung von THG-Emissionen

wird. Beim GHG-Protokoll handelt es sich um den weltweit anerkanntesten Standard zur Erfassung von THG-Emissionen. Es wurde von den Organisationen World Resource Institution (WRI) und World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) erstmals im Jahr 2001 veröffentlicht [Kra11]. Die verschiedenen Kategorien an THG-Emissionen werden dort als „Scopes“ bezeichnet [WRI13, S. 25]:

- Scope 1-Emissionen sind direkte THG-Emissionen, die durch das erfassende Unternehmen erzeugt und kontrolliert werden. Dies geschieht prinzipiell durch die folgenden Aktivitäten:
 - Das Erzeugen von Elektrizität, Wärme oder Dampf durch die Verbrennung von Energieträgern in stationären Anlagen;
 - Physikalische oder chemische Prozesse zur Fertigung oder Bearbeitung von Chemikalien und Materialien;
 - Der Transport von Materialien, Produkten, oder Mitarbeitern mit einhergehender Verbrennung von Energieträgern in mobilen Anlagen;
 - Beabsichtigte und unbeabsichtigte Freisetzung von Emissionen, zum Beispiel durch Lecks in Fügeverbindungen und Abdichtungen oder den Betrieb von Kühlanlagen.
- Scope 2-Emissionen sind indirekte THG-Emissionen, die bei der Erzeugung zugekaufter Elektrizität entstehen. In vielen Unternehmen macht diese Art einen Großteil der Gesamtemissionen aus, wodurch an dieser Stelle oft hohes Einsparpotential vorhanden ist. Dieses kann zum Beispiel für Investitionen in energieeffiziente Technologien genutzt werden.
- Scope 3-Emissionen werden optional erfasst und als sonstige indirekte THG-Emissionen definiert, die nicht den anderen Scopes zugeordnet werden können. Dazu gehören diejenigen THG-Emissionen, die mit der Unternehmenstätigkeit verbunden sind, also zum Beispiel die Emissionen durch eingekaufte Produkte oder Dienstleistungen. Darunter können externe Transportdienstleistungen, die Benutzung von verkauften Produkten durch den Endkunden, die Entsorgung von Abfällen und viele weitere Aktivitäten fallen.

Eine weitere Norm zur Erfassung von THG ging im Jahr 2004 aus dem GHG-Protokoll hervor, nämlich die von der International Organisation for Standardisation (ISO) veröffentlichte Norm ISO 14064-1:2006 „Greenhouse gases - Part1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals“ [DIN12a, S. 1].

2.4. Erfassung für Produkte und Dienstleistungen

Eine über den gesamten Lebenszyklus hinweg „wissenschaftlich fundierte, transparente und international harmonisierte“ Berechnungsgrundlage ist eine grundlegende Voraussetzung für die Erfassung von THG-Emissionen auf der Produkt- und Dienstleistungsebene [PCF13]. In diesem Zusammenhang werden in diesem Abschnitt die Methoden des LCA und PCF mit den ihnen zugehörigen wichtigsten Normen und Regelwerken vorgestellt.

2.4.1. Das LCA

Die Grundlagen zur Erstellung von Umwelt- bzw. Ökobilanzen, dem sogenannten LCA, sind in den Normen

- DIN EN ISO 14040:2006 „Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen“ [DIN06] und
- DIN EN ISO 14044:2006 „Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen“ [DIN09]

beschrieben. Demnach versteht man unter dem Begriff des LCA die

„Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges.“ [DIN06, S. 7]

Dabei sind mit dem Begriff des Lebensweges alle Phasen des Produktlebenszyklusses „von der Rohstoffgewinnung oder Rohstoffherzeugung bis zur endgültigen Beseitigung“ gemeint [DIN06, S. 7].

Das LCA kann als Methode des Umweltmanagements bezeichnet werden, in der üblicherweise ökonomische und soziale Aspekte eines Produktes oder einer Dienstleistung nicht berücksichtigt werden. Allerdings ist es möglich weitere Instrumente des Umweltmanagements mit ihr zu kombinieren. [DIN06]

Eine LCA-Studie besteht grundsätzlich aus vier Phasen, die in Abbildung 2.4 auf Seite 16 dargestellt sind und im Folgenden kurz beschrieben werden [DIN06]:

- In der Phase zur Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens werden die Systemgrenzen und der Detaillierungsgrad definiert. In diese Definition fließen der Untersuchungsgegenstand und der Zweck der LCA-Studie ein. Daher kann es bezüglich der Tiefe und Breite von verschiedenen LCA-Studien zu erheblichen Schwankungen kommen. Ein Beispiel für ein Produktsystem ist in Abbildung A.1 auf Seite 78 im Anhang dargestellt.
- In der zweiten Phase wird eine Sachbilanz erstellt (übersetzt aus dem Englischen „life cycle inventory analysis“ (LCI) [DIN06, S. 5]) . Damit ist die Erfassung von

2. Grundlagen zur Erfassung von THG-Emissionen

Eingangs- und Ausgangsgrößen gemeint, die dem betrachteten System zugeordnet werden können. Zu der Erstellung der Sachbilanz gehört neben der Identifizierung der relevanten Größen explizit auch das Sammeln der erforderlichen Daten, welche zur Erreichung des Ziels der LCA-Studie benötigt werden.

- Die dritte Phase ist die Phase der Wirkungsabschätzung der LCA-Studie (übersetzt aus dem Englischen „life cycle impact assessment“ (LCIA) [DIN06, S. 5]). Es werden zusätzliche Informationen bereitgestellt, um die Umweltrelevanz der Ergebnisse der Sachbilanz bezüglich des betrachteten Systems verständlich zu machen. Die Bestandteile und der Ablauf der Wirkungsabschätzung gehen aus Abbildung A.2 auf Seite 79 im Anhang hervor.
- Die vierte und abschließende Phase einer LCA-Studie ist die Auswertungsphase. In ihr werden die Ergebnisse der Erstellung einer Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung diskutiert und zusammengefasst (siehe auch Abbildung 2.4). Dies geschieht unter Berücksichtigung der Zielstellung und dem Untersuchungsrahmen, also den Ergebnissen der ersten Phase der Studie. Zweck der Auswertung ist das Schaffen einer „Basis für Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Entscheidungshilfen“ [DIN06, S. 5].

Das LCA basiert auf einem relativen Ansatz, innerhalb dem eine funktionelle Einheit definiert wird. Die oben beschriebenen Phasen beziehen sich auf diese Einheit, da sowohl die Ergebnisse der Sachbilanz als auch die der Wirkungsabschätzung in der funktionellen Einheit angegeben werden. Zu den Anwendungsfeldern zählen die Entwicklung und Verbesserung von Produkten, die strategische Planung, die Unterstützung politischer Entscheidungsprozesse und viele weitere (siehe auch Abbildung 2.4). [DIN09]

2.4.2. Der PCF

Für den Begriff des PCF bestehen international leicht variierende Definitionen. Eine Definition, die sich im internationalen Verständnis mehr und mehr durchsetzt, ist in [DIN12b, S. 9] zu finden [BMU12]. Danach bezeichnet der PCF die

„Summe der Treibhausgasemissionen und des Treibhausgasentzugs in einem Produktsystem, angegeben in CO₂-eq und beruhend auf einer Ökobilanz, unter Nutzung der einzelnen Wirkungskategorie Klimawandel.“ [DIN12b, S. 9]

Sie stammt aus der Norm DIN ISO 14067, die derzeit in einer Entwurfsversion vorliegt und noch 2013 in einer endgültigen Fassung durch das ISO erscheinen soll. Diese Norm stellt einen Versuch dar, einen international harmonisierten Standard für den PCF zu schaffen [BMU12]. So existieren momentan keine weitreichend anerkannten Berechnungsstandards, was sich darin äußert, dass sich viele deutsche Unternehmen an den Normen zur Ökobilanz (DIN EN ISO 14040/ 14044, siehe Abschnitt 2.4.1) orientieren, wohinge-

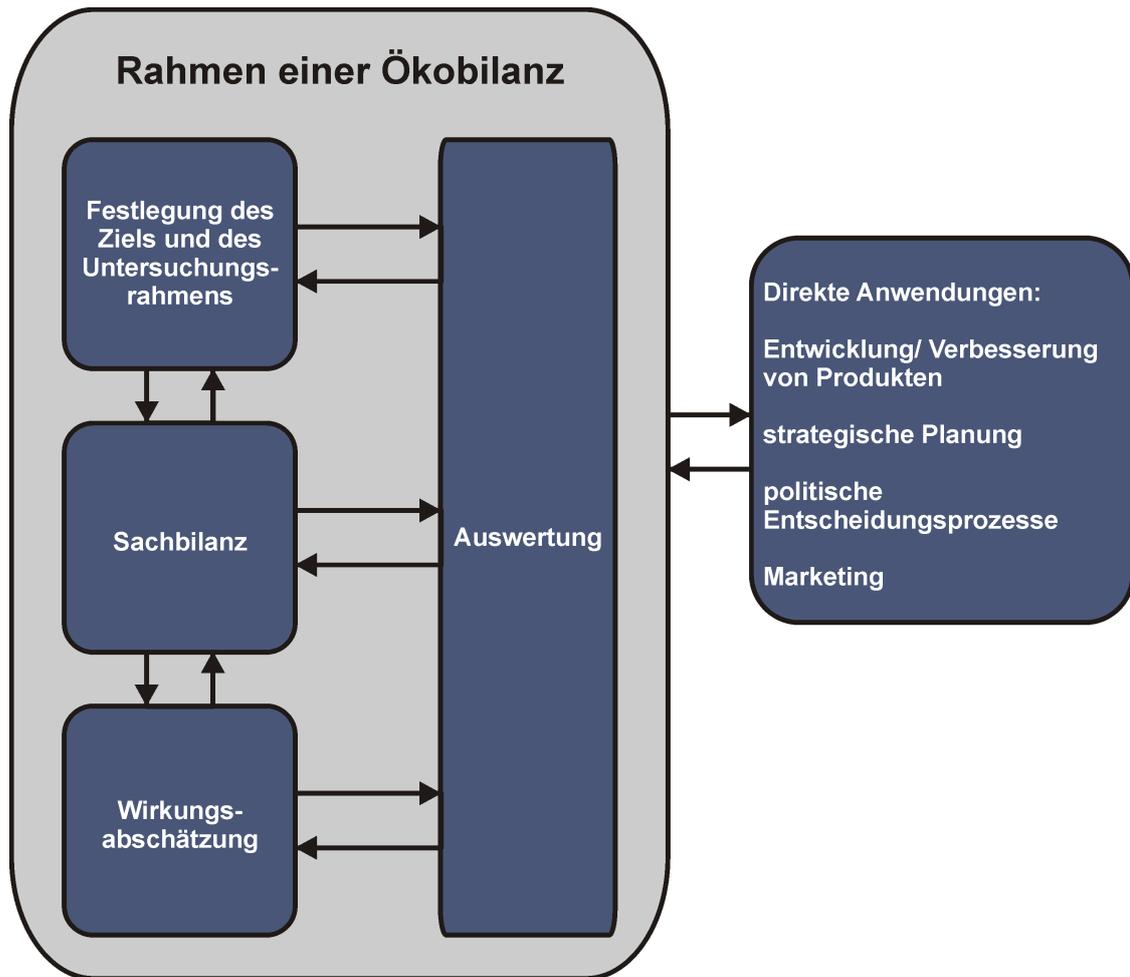


Abb. 2.4.: Phasen und Anwendung einer LCA-Studie nach [DIN09, S. 16]

gen britische Unternehmen häufig den Standard „Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services“ PAS2050 verwenden, der im Jahr 2008 von der British Standards Institution (BSI) veröffentlicht wurde [Kra11]. Auch im Rahmen des GHG-Protokolls wurde im Jahr 2011 von den Organisationen WRI und WBCSD ein „Standard für die Erhebung und Berichterstattung der Treibhausgasemissionen von Produkten“ veröffentlicht, um die Lücke innerhalb des GHG-Protokolls bezüglich der Berechnung von PCF zu schließen [BMU12].

Eine Übersicht über die eben beschriebenen Normen, Richtlinien und dem Status ihrer Veröffentlichung bietet Abbildung 2.5.

Die Methodik zur Berechnung des PCF ist in Abbildung 2.6 auf Seite 19 schematisch dargestellt und wird im Folgenden genauer beschrieben [BMU12]:

- In der ersten Phase werden Schritte zur Vorbereitung der eigentlichen Berechnung des PCF durchgeführt. Zunächst erfolgt eine Definition der Ziele der PCF-Erhebung. Dabei sollten neben dem Hauptmotiv, den THG-Ausstoß für ein bestimmtes Pro-

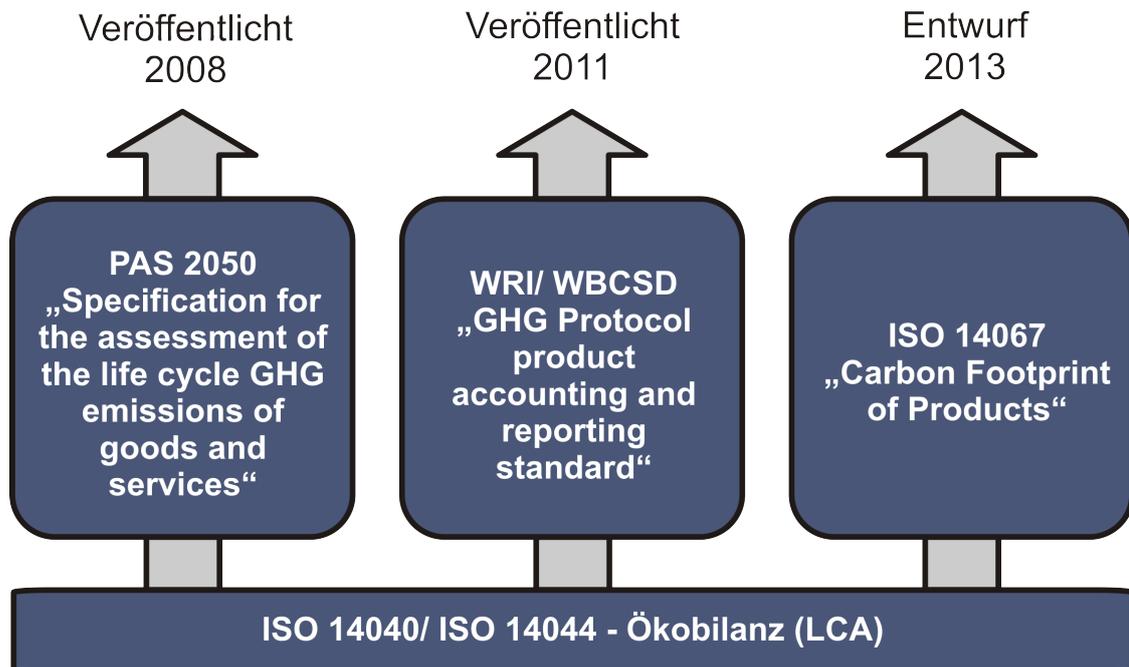


Abb. 2.5.: Standards zum PCF nach [Hoc09]

dukt zu senken, auch Antworten auf differenziertere Fragen gegeben werden, wie z.B. welche Ressourcen eingesetzt werden sollen oder wie die erwarteten Ergebnisse aussehen. Anschließend ist ausgehend von diesen Zielen eine Produktauswahl zu treffen, für die die Erhebung des PCF durchgeführt werden soll. Auswahlkriterien hierfür können z.B. die Bedeutsamkeit von Produkten hinsichtlich der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus oder das größte Einsparpotential dieser Emissionen sein. Im letzten vorbereitenden Schritt wird die funktionelle Einheit der Untersuchung bestimmt. Sie „reflektiert die Menge (...) wie ein Produkt von Endkonsumenten oder auch Unternehmenskunden angewendet wird“ und ist auch bezüglich der Vergleichbarkeit von Produkten von Bedeutung [BMU12, S. 27]. Beispiele für die funktionelle Einheit sind definierte Mengen eines Produktes (500 Milliliter eines Erfrischungsgetränkes in einer PET-Flasche) oder leistungsbezogene Einheiten (1000 Stunden/Jahr Licht einer Glühbirne). Der PCF zielt demnach auf die THG-Effektivität eines Produktes ab.

- In Phase zwei werden im Rahmen der Erstellung der Prozessnetze alle Materialien, Aktivitäten und Prozesse identifiziert, die dem Lebenszyklus des untersuchten Produktes zugeordnet werden können. Die wichtigsten Phasen des Lebenszyklus sind
 - die Rohstoffgewinnung,
 - die Produktion,

2. Grundlagen zur Erfassung von THG-Emissionen

- die Distribution,
- die Nutzung und
- die Entsorgung.

Eine beispielhafte Darstellung eines Prozessnetzes ist in Abbildung A.3 auf Seite 80 im Anhang zu sehen. Danach erfolgt die Festlegung der Systemgrenzen. Dabei werden diejenigen Prozesse aus der Ermittlung des Prozessnetzes ausgewählt, die Teil der Untersuchung sein sollen.

- In Phase drei werden die für die ausgewählten Prozesse relevanten Daten gesammelt. Hinsichtlich des Datentyps kann zwischen zwei Kategorien unterschieden werden:
 - Aktivitätsdaten, die sich auf alle Material, Energie und Transportmengen innerhalb des Lebenszyklus beziehen und in Form eines In- oder Outputs angegeben werden können. Ein Beispiel hierfür ist die Höhe des Strombedarfes eines Prozesses.
 - Emissionsfaktoren, welche den Bezug der Aktivitätsdaten auf eine Einheit beziehen. Ein Beispiel hierfür ist die Menge der Emissionen bezogen auf eine Kilowattstunde.

Anschließend erfolgt die Allokation, also die Zuordnung der über den Lebenszyklus auftretenden THG-Emissionen bei Koppelproduktion, Recycling und Abfallentsorgung. Es ist zu beachten, dass die Wahl eines Allokationsverfahrens das Ergebnis bzw. die Höhe des PCF stark beeinflussen kann.

- Im vierten Schritt erfolgt die eigentliche Berechnung des PCF. Sie besteht aus der Multiplikation der Summe aller Massen, Energie und Abfallströme eines Produktes mit den entsprechenden Emissionsfaktoren. Anders ausgedrückt findet eine Multiplikation der Aktivitätsdaten mit den Emissionsfaktoren statt.
- Bei einer Veröffentlichung des PCF sollte im Vorfeld analog zur Erstellung einer Ökobilanz nach ISO 14040 eine kritische Prüfung der Ergebnisse erfolgen. Weiterhin wird in diesem letzten Schritt für gewöhnlich eine umfangreiche Dokumentation erstellt, aus der die Organisation und der Ablauf der PCF-Erhebung ersichtlich sind. darstellen.

2.4.3. Abgrenzung von LCA und PCF

Nach der Vorstellung der Methoden LCA und PCF erfolgt in diesem Abschnitt eine kurze zusammenfassende Abgrenzung:

- Das LCA dient zur Zusammenstellung und Bewertung aller Umweltwirkungen eines Produktsystems während seines Lebensweges. Im PCF werden lediglich die THG-

2. Grundlagen zur Erfassung von THG-Emissionen

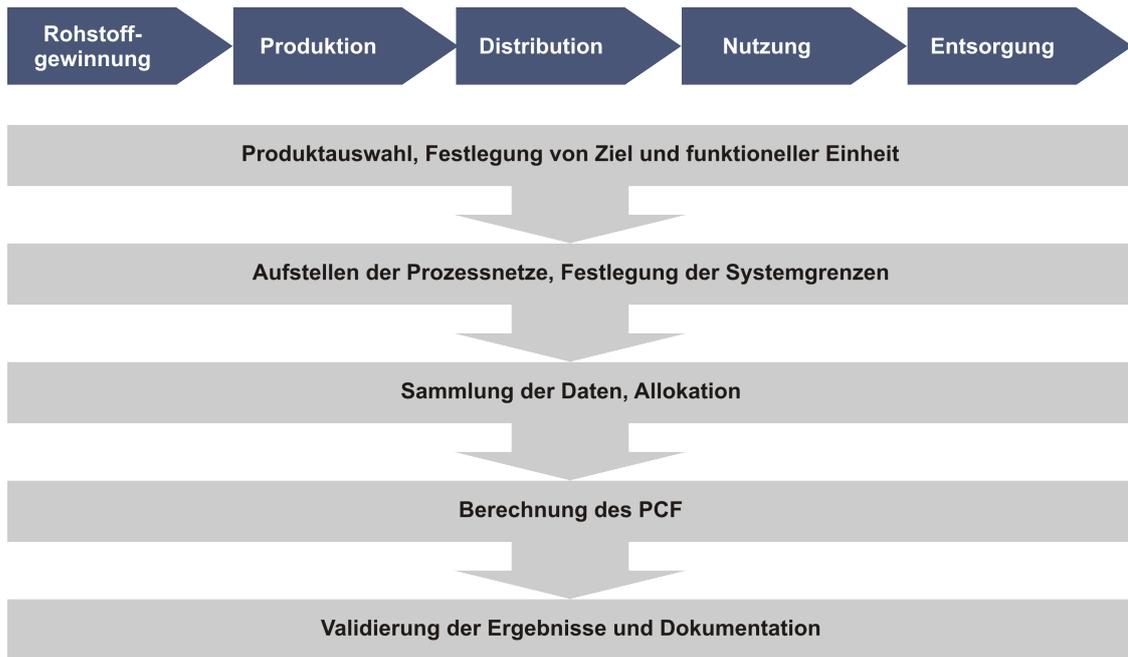


Abb. 2.6.: Schematischer Ablauf zur Erhebung eines PCF nach [BMU12]

Emissionen, ausgedrückt in CO₂-eq, erfasst. Bezogen auf den Ablauf der beiden Bilanzierungsmethoden unterscheiden sie sich also im Umfang ihrer Wirkungskategorien, wobei die einzige Wirkungskategorie bei der PCF-Erhebung das Treibhauspotential ist.

- Die Methodik während der Bilanzierung der Umweltwirkungen (im Falle des LCA) bzw. der THG-Emissionen (im Falle des PCF) sind ähnlich. Das liegt daran, dass die gängigen Standards zur Erhebung des PCF auf den Normen zur Durchführung von LCA-Studien aufbauen (siehe auch Abbildung 2.5 auf Seite 17).

3. Herleitung von KPI-Kriterien

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Charakteristika von Kennzahlen und des Begriffs des Key Performance Indicator (KPI) herausgearbeitet, die dann im weiteren Verlauf der Arbeit als Definition für den KPI-Begriff dienen. Das Ziel hierbei ist die Ableitung eines Kriterienkatalogs zur Identifizierung der relevanten THG-Parameter der Distributionslogistik und der Entwicklung von KPI.

3.1. Kennzahlen

Kennzahlen und der Begriff des KPI stehen in einem Großteil der recherchierten Literatur in einem engen Zusammenhang. Daher wird zunächst ein Überblick über die Nutzung des Kennzahlbegriffes gegeben. In der Literatur ist eine Vielzahl von Definitionen für den Begriff zu finden. Ein Überblick über insgesamt 404 Veröffentlichungen zum Thema Kennzahlen und Kennzahlensysteme wird in [Sta85] gegeben. Dort wird zunächst eine in der Literatur „weitgehend einheitlich(e)“ [Sta85, S. 24] Einteilung der Zahlenarten vorgenommen, die in Abbildung 3.1 dargestellt ist. Bei den Absolutzahlen handelt es sich

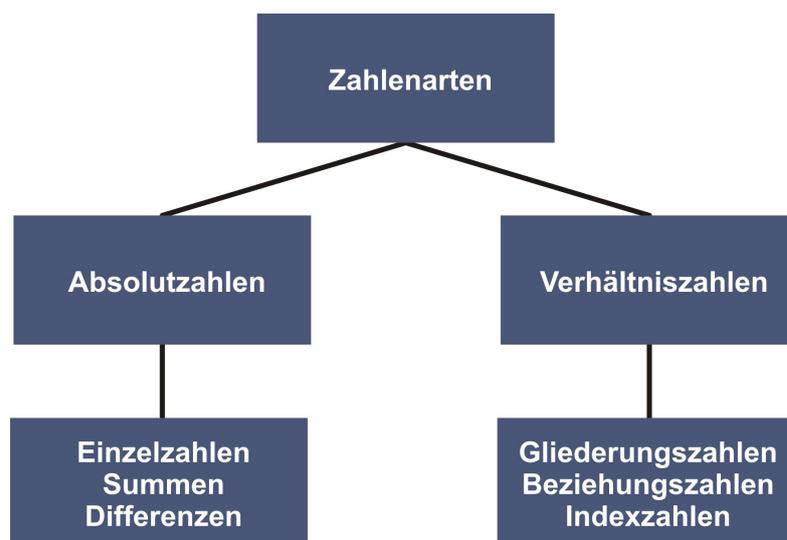


Abb. 3.1.: Die Zahlenarten nach [Sta85]

um absolute Größen, wie z.B. Mengen- oder Wertangaben [Ker71]. Sie können weiter unterteilt werden in Einzelzahlen, Summen und Differenzen [Sta85, S. 25].

3. Herleitung von KPI-Kriterien

Verhältniszahlen bestehen aus den Komponenten einer Beobachtungszahl im Zähler und einer Bezugszahl im Nenner und dienen zum Messen einer Masse an einer anderen. Sie können weiter unterteilt werden in

- Gliederungszahlen als Verhältnis zweier gleichartiger, sich in einem Unterordnungsverhältnis zueinander befindenden Massen,
- Beziehungszahlen als das Verhältnis verschiedenartiger und gleichrangiger Massen, die im gleichen Zeitraum erhoben wurden und
- Mess- und Indexzahlen, welche die durchschnittliche zeitliche Veränderung gleichartiger und gleichrangiger Massen ausdrücken. [Sta85, S. 26]

Ausgehend von dieser Einteilung der Zahlenarten wird in [Sta85] ein grundsätzliches Paradigma zur Definition des Kennzahlenbegriffs angegeben. Demnach lassen sich die Definitionen in eine enge und eine weite Fassung einteilen. Die enge Fassung schließt absolute Zahlen als Kennzahlen aus, wohingegen in der weiten Fassung sowohl absolute-, als auch Verhältniszahlen Kennzahlen sein können. Diese weite Fassung der Definition ist laut [Sta85] weiter in der Literatur zum Thema verbreitet¹. Daher liegt die weite Fassung auch der Definition des Begriffes in [Sta85] zu Grunde:

„(Eine) Kennzahl ist eine Zahl, die in Bezug auf das Erkenntnisziel relevant ist und damit im Vergleich zu anderen Zahlen einen besonderen Aussagewert hat, unabhängig von ihrer quantitativen Struktur.“[Sta85, S. 24]

Eine weitere Definition des Begriffes setzte sich in der Mitte der 1970er Jahre durch [Rei11; KB07]. Diese unterscheidet ebenfalls nicht zwischen einer weiten und engen Fassung bzw. ihr liegt die weite Fassung zu Grunde, die auch Absolutzahlen als mögliche Kennzahlen vorsieht. Demnach werden

„Kennzahlen (...) als jene Zahlen betrachtet, die quantitativ erfassbare Sachverhalte in konzentrierter Form erfassen.“[RL76, S. 706]

Es ist innerhalb der Definition also explizit kein Erkenntnisziel gefordert, was einer Verallgemeinerung der Definition nach [Sta85] gleichkommt. Da diese Definition von in einem Großteil der heutigen Standardliteratur zum Thema Controlling² und Logistik³ Verwendung findet, wird sie auch in dieser Arbeit für den Begriff der Kennzahl verwendet.

¹43,3 % der untersuchten Quellen in [Sta85, S. 23] enthalten eine Definition des Kennzahlenbegriffes. Davon sind 21 % der weiten Fassung und 17,6 % der engen Fassung zuzuordnen. In den übrigen 4,7 % der Quellen wurde nicht zwischen enger und weiter Fassung unterschieden.

²siehe z.B. [Hor09], [Rei01] und [Fri13] (in leicht abgeänderter Form)

³siehe z.B. [Sys90]

3.1.1. Eigenschaften von Kennzahlen

In [Rei11] werden die folgenden Eigenschaften als die „wichtigsten Elemente“ einer Kennzahl angeführt [Rei11, S. 24]:

- Das Element „Informationscharakter“ bedeutet, dass anhand einer Kennzahl Urteile über relevante Sachverhalte und Zusammenhänge möglich sein müssen.
- Das Element „Quantifizierbarkeit“ sagt aus, dass die einer Kennzahl zu Grunde liegenden Sachverhalte und Zusammenhänge auf einem metrischen Skalenniveau gemessen werden können. Auf diese Weise sollen möglichst präzise Aussagen möglich sein.
- Das Element der „spezifische(n) Form der Information“ bezieht sich auf eine einfache Darstellung von komplexen Strukturen und Prozessen, „um einen möglichst schnellen und umfassenden Überblick insbesondere für Führungsinstanzen zu erlauben“.

3.1.2. Klassifizierung von Kennzahlen

In der recherchierten Literatur existiert eine Vielzahl von möglichen Klassifizierungsansätzen von Kennzahlen. In diesem Zusammenhang wird der Begriff der „Kennzahlenarten“ definiert als „unterschiedliche inhaltliche Ausprägungen von Kennzahlen als das Ergebnis der verschiedenen Klassifikationsansätze“ [Sta85, S. 27]. Da die aufgeführten Kennzahlenarten sehr unterschiedlich sind, bietet sich die Bildung eines übergeordneten Paradigmas zur Abgrenzung an. Ein solches Muster ist in [Rei11] zu finden, wobei die folgenden Unterscheidungskriterien innerhalb einer Kennzahlenklassifikation aufgezählt werden [Rei11, S. 25]:

- Als „Informationsbasis“ wird derjenige „Informative Speicher“ verstanden, der den Rezipienten einer Kennzahl über den ihr zu Grunde liegenden Sachverhalt zu informieren hat. Typische Beispiele für diese informativen Speicher aus der Betriebswirtschaftslehre sind die Kostenrechnung und die Betriebs- und Finanzbuchhaltung.
- Bei der „statistischen Form“ als Unterscheidungskriterium für Kennzahlen wird zwischen relativen und absoluten Zahlen unterschieden, analog zu Abschnitt 3.1 auf Seite 20.
- Die „Zielorientierung“ beschreibt die Ziele, die bei der Benutzung von Kennzahlen im Vordergrund stehen. Diese Ziele können in definierten Maßgrößen erfasst werden, wie z.B. Erfolgs-, Liquiditäts- oder numerische Größen.
- Der „Objektbereich“ einer Kennzahl ist abhängig vom Untersuchungsgegenstand, der ihr zu Grunde liegt. So erfordert zum Beispiel der Objektbereich eines Gesamtunternehmens den Einsatz von Kennzahlen, die sich auf gesamt-betriebliche

Zusammenhänge beziehen.

- Unter dem „Handlungsbezug“ von Kennzahlen ist das Vorhandensein einer Handlungsaufforderung zu verstehen, die aus der Kennzahl hervorgeht. In diesem Zusammenhang lassen sich Kennzahlen in normative Größen, die eine solche Handlungsaufforderung beinhalten, und deskriptive Größen, die Sachverhalte lediglich beschreiben, unterteilen.

3.2. Key Performance Indicators

In der Literatur existieren verschiedene Definitionen für den Begriff des KPI.

In [KA10] mit dem Untertitel „Key Performance Indicators“ wird der Begriff zwar nicht explizit definiert, aber im Kontext des Einsatzes in Balance Scorecards als Kennzahl verwendet. In dieser Quelle wird demnach nicht zwischen den Begriffen Kennzahl und KPI unterschieden.

Dieser Logik wird auch in [Hil08] gefolgt. Dort werden KPI als Kennzahlen des Performance Measurements definiert und mit dem Begriff „performance measures“ beschrieben [Hil08, S. 36]. Das bedeutet, dass auch hier der Begriff KPI von seiner Semantik her synonym zu dem Begriff der Kennzahl verwendet wird und die Existenz beider Begriffe nur in ihrer Verwendung in unterschiedlichem Kontext begründet ist.

Einen Schritt weiter bezüglich der Synonymität der Begriffe Kennzahl und KPI wird in [San05, S. 429] gegangen. Dort wird der Begriff des KPI als Übersetzung des Kennzahlbegriffes ins Englische definiert, wobei erneut das Umfeld des Performance Measurements genannt wird.

Fasst man die beiden letztgenannten Quellen zusammen, so können KPI definiert werden als Kennzahlen innerhalb des Performance Measurements. Um daraus weitere Schlüsse ziehen zu können, wird im folgenden der Begriff des Performance Measurements im Sinne dieser KPI-Definition erläutert:

„Performance Measurement bezeichnet den Aufbau und Einsatz meist mehrerer quantifizierbarer Maßgrößen verschiedenster Dimension (z.B. Kosten, Zeit, Qualität, Innovationsfähigkeit, Kundenzufriedenheit etc.). Diese werden zur Beurteilung der Effektivität und Effizienz der Leistung und Leistungspotentiale unterschiedlichster Objekte im Unternehmen (Organisationseinheiten unterschiedlicher Größe, Mitarbeiter, Prozesse etc.) herangezogen.“[Gle01, S. 11]

Aus dieser Definition kann weiter abgeleitet werden, dass es sich bei KPI um Kennzahlen zur Beurteilung von Leistung handelt.

In den folgenden beiden Definitionen steht der Zeitbezug von KPI im Vordergrund. In

3. Herleitung von KPI-Kriterien

[Rei11] wird dabei vom Begriff des Indikators ausgegangen. Demnach können Kennzahlen auch als „Indikatoren für Sachverhalte interpretiert werden, auf deren Basis die Unternehmensleitung zielbezogen plant und kontrolliert“ [Rei11, S. 28]. Solche Indikatoren folgen aus einem Selektionsprozess, bei dem Kennzahlen, die wenig Bezug zu Unternehmenszielen haben, ausgesondert werden. Die Beziehung eines Indikators zu einem Unternehmensziel ist in diesem Zusammenhang nicht als Ursache, sondern als Signal für die Veränderung einer Einflussgröße zu interpretieren. Damit haben KPI eine grundsätzliche Informations- und Warnfunktion und sind somit auf die Zukunft ausgerichtet. [Rei11]

In einer weiteren Definition in [Par10] wird der Indikatorbegriff weiter differenziert. Es wird zum Einen zwischen vergangenheitsbezogenen Ergebnisindikatoren und zum Anderen zwischen zukunftsbezogenen Leistungsindikatoren unterschieden, wobei mit letzteren eine klare Handlungsaufforderung einhergeht. Ein KPI wird anschließend als Leistungsindikator charakterisiert, mit Hilfe dessen sich die Unternehmensleistung deutlich steigern lässt. [Par10]

Der Begriff wird daraufhin folgendermaßen definiert:

„KPIs represent a set of measures focusing on those aspects of organizational performance that are the most critical for the current and future success of the organization.“[Par10, S. 4]

3.3. KPI-Kriterien

Auf Grundlage der in den letzten beiden Abschnitten vorgestellten Definitionen und Charakteristika zum Kennzahl- und KPI-Begriff, wird nun eine in dieser Arbeit gültige Definition für den Begriff abgeleitet.

Unabhängig von kleineren Unterschieden lassen sich bei der Bildung der semantischen Schnittmenge der Definitionen immer wiederkehrende Grundkriterien für den KPI Begriff erkennen. In Abbildung 3.2 wird ein Überblick über die verschiedenen Charakteristika mit ihrer Herkunft gegeben.

Daraus abgeleitet lauten die in dieser Arbeit verwendeten Kriterien zur Aufschlüsselung der THG-Parameter und Entwicklung von KPI:

- KPI sind auf die Erreichung eines Ziels bezogen und stellen den Grad der Zielerfüllung bzgl. eines definierten Zielzustandes dar. Es handelt sich deshalb um Verhältniszahlen;
- KPI stellen relevante Sachverhalte in konzentrierter Form dar;
- KPI enthalten eine konkrete Handlungsaufforderung.

3. Herleitung von KPI-Kriterien

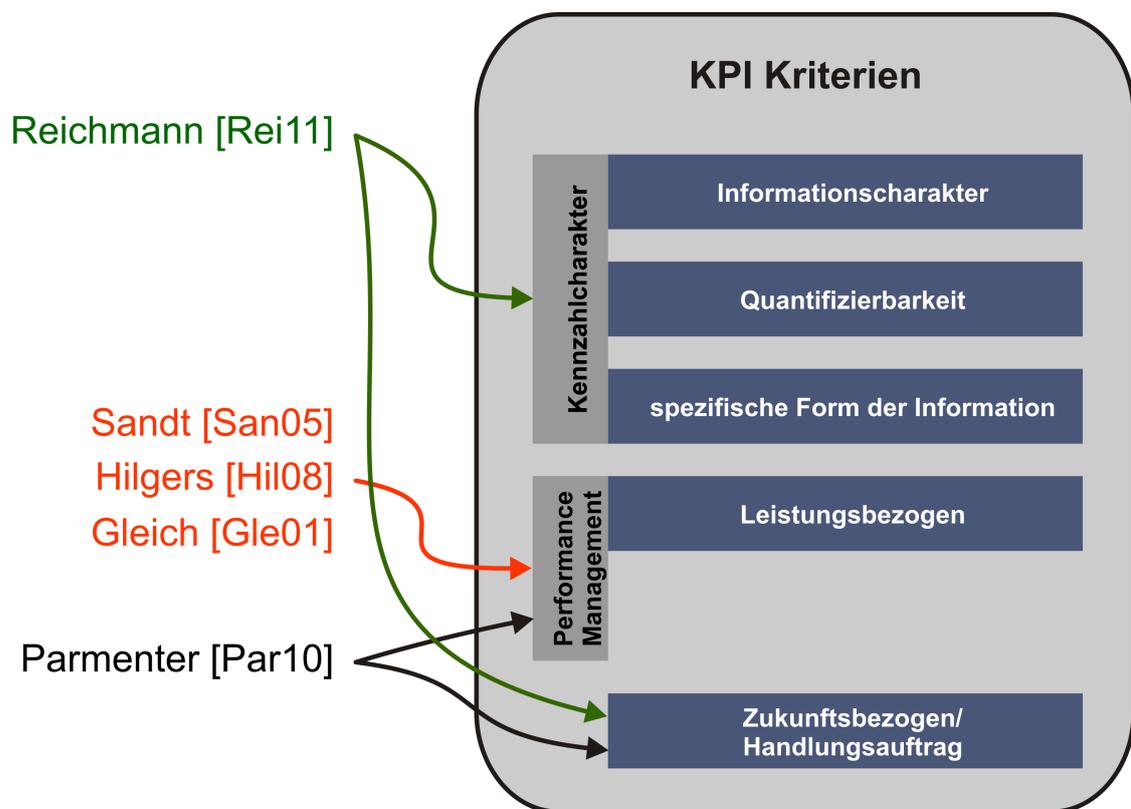


Abb. 3.2.: Übersicht und Herkunft der abgeleiteten KPI-Kriterien

4. Definition der Systemgrenzen

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Begriffe aus der Logistik definiert, die für das weitere Verständnis der Arbeit benötigt werden. Anschließend wird der Bereich der Distributionslogistik eingegrenzt, der im Zuge der Aufschlüsselung der THG-Parameter und der Entwicklung von KPI betrachtet wird.

4.1. Definition der Logistik

Es existiert eine Vielzahl von Definitionen für den modernen Logistikbegriff. Logistische Prozesse können dadurch charakterisiert werden, dass sie auf eine

„(...) Raumüberbrückung (Transport), Zeitüberbrückung (Lagerung) und Veränderung der Anordnung (Kommissionierung) der Objekte“

hin ausgerichtet sind [Arn04, S. 4]. Solche Objekte können im Sinne der Logistik entweder Sachgüter, Personen oder Informationen sein. Zu den eben genannten Prozessen Transport, Lagerung und Kommissionierung können außerdem das Be- und Entladen (Umschlag), das Verpacken und solche Prozesse hinzugefügt werden, die innerhalb von Informations- und Kommunikationssystemen (IK-Systeme) auftreten. [Arn04]

Im Folgenden werden die Prozesse genauer beschrieben [Arn04, 6ff]:

- Bei Transportprozessen kann zwischen innerbetrieblichem und außerbetrieblichem Transport unterschieden werden. Außerbetrieblicher Transport findet einerseits auf der Beschaffungsseite vom Lieferanten zum Unternehmen und andererseits auf der Distributionsseite vom Unternehmen zum Kunden statt. Um einen Transportprozess über größere Entfernungen zu realisieren findet häufig eine Aufteilung des Prozesses auf mehrere Umschlagspunkte statt, wobei an diesen Punkten auch ein Wechsel des Transportmittel erfolgen kann. Innerbetrieblicher Transport liegt zwischen Produktionsstellen, Lagern und dem Warenein- bzw. Ausgang vor.
- Umschlagprozesse bezeichnen das Be- und Entladen von Transportmitteln, das Ein- und Auslagern, sowie das Sortieren. Sie verbinden den außerbetrieblichen Transport mit dem innerbetrieblichen Materialfluss oder einzelne Transportabschnitte miteinander.

4. Definition der Systemgrenzen

- Unter Kommissionierprozessen versteht man die Zusammenführung oder Trennung von Objektmengen zu Aufträgen. Dabei können auch Artikel verschiedener Art in einem Auftrag enthalten sein. Die Aufträge beziehen sich entweder auf die innerbetriebliche Materialbereitstellung oder auf den Kunden.
- Lagerprozesse umfassen das Einlagern, die Lagerung an sich und das Auslagern von Objekten. Dabei stellt die Lagerung keine eigene Aktivität dar. Zur Ein- und Auslagerung ist eine Vielzahl von Strategien möglich. Die Lagerdauer und die Höhe des Lagerbestandes ergeben sich aus den vor- und nachgelagerten Prozessen (z.B. Transport- oder Produktionsprozessen).
- Das Verpacken dient neben dem Schutz des verpackten Gutes auch anderen logistischen Prozessen, wie der Verbesserung der Handhabung eines Gutes bei Umschlag und Kommissionierung. Auch können durch eine Verpackung Informationen mit einem Objekt verknüpft werden. Eine Möglichkeit dazu ist das Befestigen von RFID-Etiketten. Verpackungsprozesse sind oft auch Teilprozesse der Produktion oder Kommissionierung.

Die aufgezählten Logistikprozesse werden meist in Zusammenhang mit einem Logistiksystem betrachtet. Ein solches System hat die Struktur eines Netzwerks, welches aus Knoten besteht zwischen denen durch die Prozesse ein Fluss gebildet wird. Die Knoten des Netzwerks können Lager- oder Produktionsorte, die Verbindungslinien Transportwege repräsentieren. [Arn04]

Auf Grundlage dieser Definition eines Logistiksystems und der Prozessdefinitionen wird in dieser Arbeit auf die folgende Logistikdefinition zurückgegriffen:

„Logistik bedeutet die Gestaltung logistischer Systeme sowie die Steuerung der darin ablaufenden logistischen Prozesse.“[Arn04, S. 1]

4.2. Definition der Distributionslogistik

Die Distributionslogistik ist neben der Beschaffungs-, der Produktions- und der Entsorgungslogistik ein Teilbereich der Unternehmenslogistik (siehe Abschnitt 4.1). Sie beinhaltet den

„Waren- und Materialfluß (!sic) sowie den zugehörigen Informationsfluß (!sic) von der Produktion über das Distributionslager bis zu dem Kunden.“[Mar02, S. 7]

Das Ziel bzw. die Aufgabe der Distributionslogistik ist die Planung, Steuerung und Gestaltung des Material- und Informationsflusses zum Kunden. Wichtige Einflussgrößen auf die Gestaltung der Distributionslogistik sind die Kundenstruktur (z.B. Großabnehmer,

Einzelhandel, etc...) oder das Verteilungsprinzip (z.B. Anzahl der Lagerstufen). [Mar02]

4.3. Eingrenzung der Distributionslogistik für diese Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von KPI bezüglich der Emission von THG innerhalb der Distributionslogistik des Lebensmittelsektors. Das KPI-Kriterium (siehe Abschnitt 3.3 auf Seite 24), welches nicht auf die Struktur einer Kennzahl, sondern auf den durch sie reflektierten Sachverhalt abzielt, ist das Kriterium des Informationscharakters. Nach diesem Kriterium sind diejenigen Prozesse der Distributionslogistik zu analysieren, die für die Emission von THG besonders relevant sind.

Die Bedeutung des Frachtguttransportes hinsichtlich der Emission von THG kann weltweit mit einem Anteil von etwa 8 % beziffert werden [McK10a]. Dabei macht der Transport über die Straße in den meisten Industrieländern den größten Anteil aus und stellt gleichzeitig den am stärksten wachsenden Anteil möglicher Transportmodi dar [ME10].

Deshalb wird in dieser Arbeit der Fokus auf den Frachtguttransport über die Straße gelegt. Außerdem erfolgt eine allgemeinere Betrachtung des Lagerprozesses, insbesondere der Kühlung, die im Lebensmittelsektor einen großen Teil des Energieverbrauchs bei der Lagerung ausmacht. So zeigen Daten des Verbandes Deutscher Kühllhäuser und Kühllogistikunternehmen (VDKL) das rund 70 % des Energieverbrauchs in Kühllhäusern auf die Kälteanlagen und nur unter 10 % auf Beleuchtung und Fördermittel zurückzuführen sind [Kra11].

Aus diesen Überlegungen heraus sind die in dieser Arbeit betrachteten Logistikprozesse innerhalb der Distributionslogistik

- der Frachtguttransport über die Straße und
- die Lagerung, insbesondere die Kühlung.

Eine schematische Darstellung der Eingrenzung der Distributionslogistik für diese Arbeit ist in Abbildung 4.1 zu sehen.

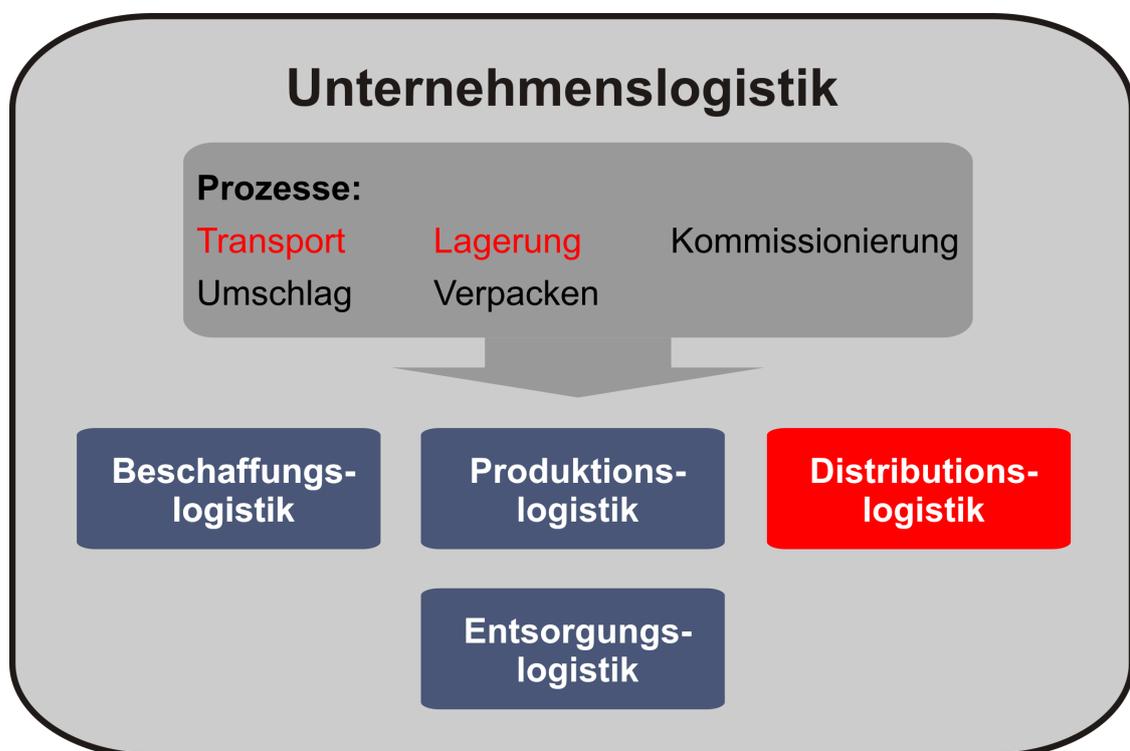


Abb. 4.1.: Schematische Darstellung der Systemgrenzen dieser Arbeit

5. Grundlagen zur Berechnung von THG-Emissionen

5.1. Die Grundformel der Emissionsberechnung

Ein Grundprinzip bei der Berechnung von THG-Emissionen ist die Umrechnung des Energieverbrauchs in CO₂-eq über einen Umrechnungsfaktor (Formel 5.1). Dies wird in einem Großteil der recherchierten Literatur so umgesetzt, unter Anderem im Leitfaden “Guidance on measuring and reporting Greenhouse Gas (GHG) emissions from freight transport operations” [DEF10] oder im Projektbericht “EcoTransit: Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports” [ife11], veröffentlicht durch das Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU). Außerdem ist diese Methodik zu Berechnung Teil der Norm DIN EN 16258 [DIN13b] auf die sich in einem großen Teil dieses Kapitels bezogen wird.

$$EM_{CO_2} = F_{CO_2} \cdot EV \tag{5.1}$$

wobei EM_{CO_2} Emission von Kohlendioxiden bzw. CO₂-eq (in kg)

F_{CO_2} CO₂-Umrechnungsfaktor (in kg/l)

EV Energieverbrauch (in l)

5.2. Ermittlung der Umrechnungsfaktoren

In diesem Abschnitt wird die Ermittlung der Umrechnungsfaktoren der für diese Arbeit relevanten Energieformen vorgestellt. Zuvor wird ein kurzer Überblick über wichtige Datenquellen gegeben, aus denen die Umrechnungsfaktoren entnommen werden können.

5.2.1. Übersicht über die Datenquellen

Für die Ermittlung von Umrechnungsfaktoren existiert eine breite Datenbasis. Ein kurzer Überblick über wichtige Datenquellen wird in der folgenden Aufzählung gegeben [Kra11]:

- Die Richtlinie 2009/28/EG (Erneuerbare-Energien-Richtlinie) [EU09] des Europäi-

5. Grundlagen zur Berechnung von THG-Emissionen

schen Rates- und Parlaments beinhaltet Umrechnungsfaktoren für Diesel, Benzin und Biokraftstoffe;

- Das Verkehrsemissionsmodell Transport Emission Model (TREMOT) [ife12], welches im Auftrag des BMU entwickelt wurde. Es beinhaltet Umrechnungsfaktoren für die Kraftstoffarten des Straßen, Schienen und Luftverkehrs.
- Das Emissionsmodell Global Emission Model (GEMIS) enthält Umrechnungsfaktoren für alle Verkehrsträger, Elektrizität, Wärmeerzeugung und viele andere Verbrauchsquellen. Eine Excel-Tabelle mit ausgewählten Ergebnisdaten kann unter [IIN13] eingesehen werden.
- Außerdem zu nennen ist die Ökobilanzdatenbank Ecoinvent, die eine weltweit anerkannte Datenquelle für Ökobilanzdaten darstellt.

Eine differenziertere Betrachtung dieser und weiterer Datenquellen wird in dieser Arbeit nicht vorgenommen, da es für die Aufschlüsselung der THG-Parameter nicht auf den Inhalt, sondern die Struktur der Datenquellen ankommt. Das bedeutet, dass es z.B. nicht um den absoluten Wert für einen Umrechnungsfaktor, sondern um die Unterscheidung ob lediglich Kohlendioxid oder auch weitere THG berücksichtigt werden, geht.

5.2.2. Kraftstoffe für Motoren

Innerhalb der Logistik wird ein großer Teil des klimarelevanten Kohlendioxid im Transportbereich, bei der Verbrennung fossiler Kraftstoffe erzeugt. Beim Verbrennungsvorgang reagieren die Kohlenstoffatome des Kraftstoffes mit dem Sauerstoff in der Luft, wobei sich ein Kohlenstoffatom mit zwei Sauerstoffatomen zu Kohlendioxid verbindet. Bei der Berechnung der Umrechnungsfaktoren müssen Differenzierungen vorgenommen werden, von denen der Umrechnungsfaktor eines Kraftstoffes abhängig ist [Kra11]:

- Die Menge des erzeugten Kohlendioxid hängt von der Anzahl der Kohlenstoffatome im Kraftstoff, sowie dem Energiegehalt bzw. dem Heizwert des Kraftstoffes ab;
- Aufgrund verschiedener Zusammensetzungen können sich die Umrechnungsfaktoren von Land zu Land unterscheiden;
- Einerseits kann lediglich der Ausstoß von Kohlendioxid berücksichtigt werden, andererseits können auch weitere THG mit einbezogen werden, die bei der Verbrennung entstehen, wie zum Beispiel Methan (CH_4) oder Distickstoffoxid (N_2O);
- Analog zum vorherigen Punkt können lediglich direkte Emissionen berücksichtigt werden, d.h. diejenigen Emissionen, die bei der Verbrennung im Motor entstehen. Dieser Emissionsbereich wird auch Tank-to-Wheel (TTW) genannt. Andererseits können auch die Emissionen berücksichtigt werden, die bei der Erzeugung des Kraftstoffes entstehen. In diesem Falls spricht man von Well-to-Wheel (WTW) bzw. der

5. Grundlagen zur Berechnung von THG-Emissionen

Einbeziehung der Energievorkette. Dies wird unter anderem in der Norm DIN EN 16258:2013 [DIN13b] gefordert.

Ein Beispiel für die konkrete Berechnung eines Umrechnungsfaktors für einen Liter Diesel, wie er in Deutschland erhältlich ist, ist in [Kra11, S. 82] gegeben. Dabei handelt es sich um einen TTW-Umrechnungsfaktor, d.h. die Energievorkette wurde nicht berücksichtigt. Außerdem wurden keine weiteren THG neben Kohlendioxid mit einbezogen. Die Grundlage der Berechnung sind die Formeln 5.2 und 5.3.

$$m_C = m_{Diesel} \cdot C_{Anteil} \quad (5.2)$$

$$FCO_2,TTW = m_C \cdot \frac{A_{r,CO_2}}{A_{r,C}} \quad (5.3)$$

| | | |
|-------|--------------|--|
| wobei | m_C | Kohlenstoffmasse in einem Liter Diesel (in kg) |
| | m_{Diesel} | Masse eines Liters Diesel (in kg) |
| | C_{Anteil} | Kohlenstoffanteil in einem Liter Diesel (in %) |
| | FCO_2,TTW | CO ₂ -Umrechnungsfaktor für Diesel, TTW (in kgCO ₂ /l) |
| | A_{r,CO_2} | relatives Atomgewicht des emittierten Kohlendioxid (in uCO ₂) |
| | $A_{r,C}$ | relatives Atomgewicht des umgesetzten Kohlenstoffs (in uCO ₂) |

Es werden folgende Werte zur Berechnung des Umrechnungsfaktors angenommen:

- m_{Diesel} : Ein Liter Diesel wiegt im Durchschnitt 0,835 kg.
- C_{Anteil} : Der Kohlenstoffanteil in Diesel liegt bei durchschnittlich 86,7 %.
- A_{r,CO_2} : Jedes Kohlenstoffatom wiegt zwölf Atomeinheiten. Da jedes Sauerstoffatom 16 Atomeinheiten wiegt, ergibt sich bei der Bildung von CO₂ ein Gesamtgewicht von 44 Atomeinheiten.

Setzt man diese Werte in die Formeln 5.2 und 5.3 ein, erhält man:

$$m_C = 0,835 \text{ kg} \cdot 0,867 = 0,724 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$FCO_2,TTW = 0,724 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \cdot \frac{44 \text{ uCO}_2}{12 \text{ uC}} = 2,65 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{l}}$$

Neben diesem Bezug auf physikalische Einheiten ist eine weitere Methode zur Berechnung des Umrechnungsfaktors der Bezug auf den Energiegehalt - oder präziser ausgedrückt - den Heizwert des Kraftstoffes. Dieser wird meist in Megajoule (MJ) angegeben [Kra11].

Auf die Darstellung eines Beispiels zur Berechnung eines heizwertbezogenen Umrechnungsfaktors wird an dieser Stelle verzichtet, da ein solcher Detaillierungsgrad bei der

späteren Aufschlüsselung der THG-Parameter nicht benötigt wird. Es ist allerdings anzumerken, dass in den meisten Richtlinien und Normen, in denen auf Umrechnungsfaktoren verwiesen wird, eine heizwertbezogene Berechnung gefordert wird (siehe z.B. [DIN13b])

5.2.3. Elektrischer Strom

Bei der Erzeugung von elektrischem Strom werden THG emittiert. Das passiert z.B. bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern wie Kohle, Erdgas oder Öl in Kraftwerken. Von der Umwandlung der dabei freigesetzten Energie in Elektrizität bis hin zum Verbrauch der Elektrizität treten Verluste auf, die bei der Ermittlung eines Umrechnungsfaktors zu berücksichtigen sind. Unter Anderem die folgenden Einflussgrößen wirken sich auf die Höhe der Verluste aus [Kra11]:

- der Typ der Anlage, der zur Stromerzeugung eingesetzt wird bzw. die Technik die bei der Stromerzeugung zum Einsatz kommt,
- der technische Zustand dieser Anlagen und
- die Dichte der Hoch- und Mittelspannungsleitungen, die dem Transport der Energie zum Verbraucher dienen.

Im Vergleich zu den Umrechnungsfaktoren für Kraftstoffe (siehe Abschnitt 5.2.2 auf Seite 31) sind die Umrechnungsfaktoren der Stromerzeugung stärker länderabhängig. Das hängt damit zusammen, das der sogenannte “Kraftwerksmix”, also die Zusammensetzung des Systems zur Energieversorgung aus verschiedenen Kraftwerkstypen, von Land zu Land unterschiedlicher ist als z.B. der Kohlenstoffanteil in Diesel [Kra11, S. 95]. Des Weiteren sind die oben aufgezählten Einflussfaktoren sehr länderabhängig. [Kra11]

Die Berücksichtigung der Vorkette der verschiedenen Techniken der Stromerzeugung stellt ebenfalls eine wichtige Einflussgröße auf den Umrechnungsfaktor dar.

“Um die Energie- und CO₂ -Bilanz einer Technik vollständig zu erfassen, bedarf es eines ganzheitlichen Ansatzes über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Bau, Betrieb, Wartung und Reparatur der Anlage sowie ihre Entsorgung am Ende der Nutzungsdauer erfordern Materialien und Hilfsenergien. Aus diesen Vorketten resultieren weitere klimarelevante Emissionen.”[Wag+07, S. 1]

Weiterhin hängt die Ermittlung der Umrechnungsverfahren von der Datenbasis bzw. der innerhalb der Datenbasis angewandten Methode ab. Teilweise wird eine Prozesskettenanalyse verwendet, bei der die THG-relevanten Prozesse wie der Bau-, der Betrieb und die Entsorgung einer Anlage zur Energieerzeugung in einer Vielzahl von Einzelschritten betrachtet und hinsichtlich ihrer In- und Outputströme bewertet werden. Eine andere Methode ist die Input-Output-Analyse, bei der zunächst spezifische Werte für den Energieverbrauch in einzelnen Energiesektoren ermittelt werden, um diese dann über die

5. Grundlagen zur Berechnung von THG-Emissionen

Zuordnung von Investitionskosten zu Wirtschaftszweigen zu bewerten. Des Weiteren unterschieden sich oftmals die Systemgrenzen einzelner Datenquellen, wie z.B. der Standort, der Energiemix oder der Zeitraum, sowie die berücksichtigten THG. [Wag+07]

Die Abhängigkeit des Umrechnungsfaktors einerseits von der Technik der Stromerzeugung und andererseits von der verwendeten Datenbasis ist in Abbildung 5.1 veranschaulicht. Dort ist für verschiedene Techniken eine Bandbreite für Umrechnungsfaktoren aus verschiedenen Quellen dargestellt.

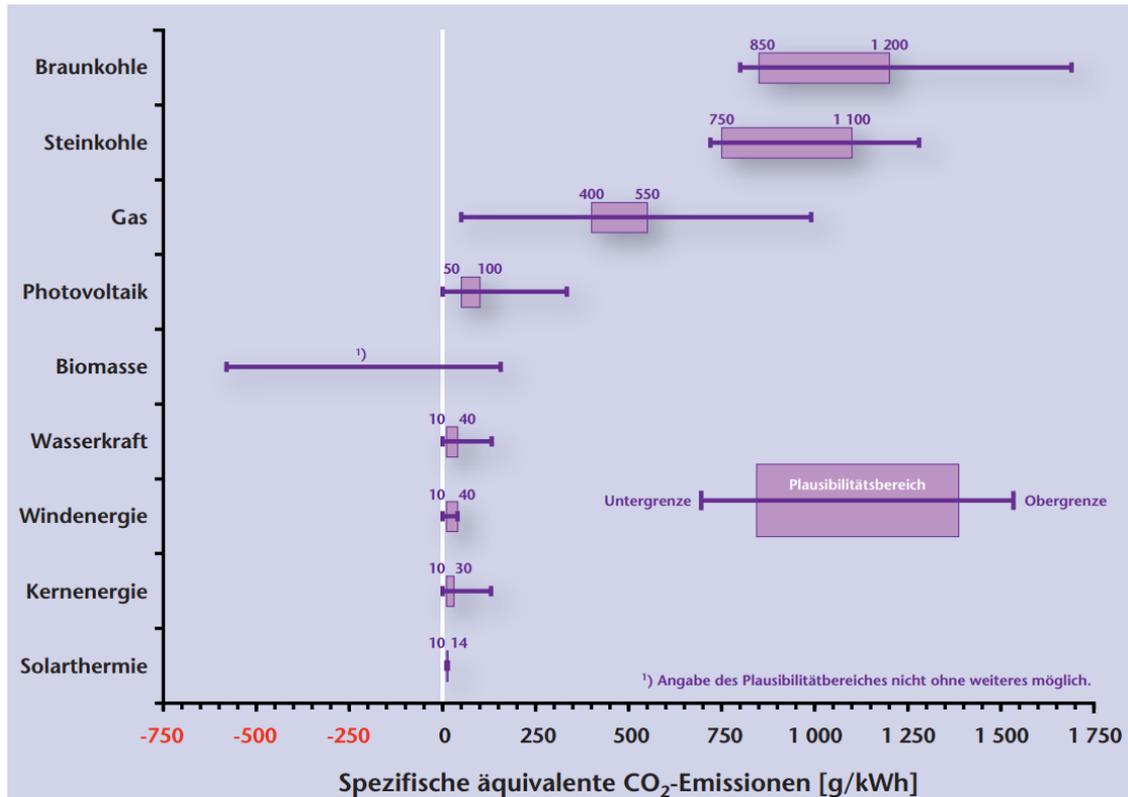


Abb. 5.1.: Abhängigkeit des Umrechnungsfaktors von der Technik der Stromerzeugung und der Datenbasis [Wag+07, S. 50]

Auf Deutschland bezogen gibt das BMU jährlich einen Bericht über die “Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix” heraus [Ich13]. In diesem werden die Kohlendioxidemissionen der Stromerzeugung, der Stromverbrauch, sowie der Umrechnungsfaktor, der durch das BMU als „Emissionsfaktor“ bezeichnet wird, aufgeführt [Ich13, S. 1]. Die zu Grunde liegenden Berechnungen finden zu Jahresbeginn statt und die Daten werden in einer Zeitreihe beginnend mit dem Jahr 1990 dargestellt. Der aktuelle Stand dieser Reihenentwicklung ist in Abbildung A.4 auf Seite 81 im Anhang zu sehen. Zu beachten ist, dass es sich bei der rot markierten Spalte lediglich um die Emissionsfaktoren ohne Einbeziehung der Energievorkette handelt. Trotzdem sind diese Daten zur Veranschaulichung der zeitlichen Veränderung der Emissionsfaktoren geeignet. Die Berechnungsgrundlage ist durch Formel 5.4, welche der Grundformel zur Berechnung

5. Grundlagen zur Berechnung von THG-Emissionen

der CO₂-Emissionen (Formel 5.1) entspricht, gegeben. [Ich13]

$$FCO_{2,direkt} = \frac{EM_{CO_2,direkt}}{EV_{Strom}} \quad (5.4)$$

wobei $FCO_{2,direkt}$ Umrechnungsfaktor bezüglich direkter CO₂-Emissionen (in g/kWh)
 $EM_{CO_2,direkt}$ Menge des direkten, emittierten Kohlendioxid (in g)
 EV_{Strom} Gesamtjahresstromverbrauch (in kWh)

Eine Darstellung von Umrechnungsfaktoren, welche auch die Energievorkette und -Verluste mit einbezieht, sowie die Faktoren aus verschiedenen Ländern und Regionen gegenüberstellt und alle THG-Emissionen beinhaltet, ist in [Kra11] zu finden (siehe Abbildung A.5 auf Seite 82 im Anhang). Die Daten stammen unter Anderem aus Ecoinvent und sind auf das Jahr 2005 bezogen. Die Berechnung der Faktoren verläuft analog zu Formel 5.4.

Neben dem Verbrauch von Strom aus dem öffentlichen Netz, sind noch die Besonderheiten von Ökostrom und einer Eigenstromerzeugung hervorzuheben [Kra11]:

- Ökostrom bezeichnet Strom aus regenerativen Quellen wie Wasser, Wind, Sonne oder Biomasse. Außerdem wird dieser Kategorie der Strom zugerechnet der in Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erzeugt wird. Derzeit existiert noch kein anerkannter Standard zur Berechnung der THG-Emissionen aus Ökostrom. Ein Vorschlag zur Berechnung wurde von mehreren Umweltforschungsinstituten erarbeitet (unter Anderem durch IFEU und dem Institut für angewandte Ökologie (Öko-Institut), siehe [Peh+08]) und durch das BMU empfohlen. Der Vorschlag unterscheidet zwischen dem Alter von Anlagen, die den Biostrom erzeugen und wird in Abbildung 5.2 veranschaulicht:
 - Neuanlagen (maximal sechs Jahre alt): Es werden die spezifischen Emissionen der Anlagen zu Grunde gelegt, d.h. Bauvorleistungen werden nicht berücksichtigt. Mit Ausnahme von Biogasanlagen ergibt sich daher in der Regel ein Emissionsfaktor von 0.
 - Bestandsanlagen (sechs bis zwölf Jahre alt): Die spezifischen Emissionen der Anlagen werden analog zum ersten Punkt zu 50 % gewertet, die andere Hälfte macht der durchschnittliche Umrechnungsfaktor des jeweiligen Landes aus.
 - Altanlagen (älter als zwölf Jahre): Es erfolgt keine spezifische Bilanzierung, d.h. es wird der Strommix des jeweiligen Landes zu Grunde gelegt.
- Bei der Eigenstromerzeugung wird Strom in der Regel durch Photovoltaikanlagen oder Blockheizkraftwerke erzeugt. Eine daraus resultierende Emissionsminderung kann durch ein Unternehmen nur angerechnet werden, wenn es den erzeugten Strom

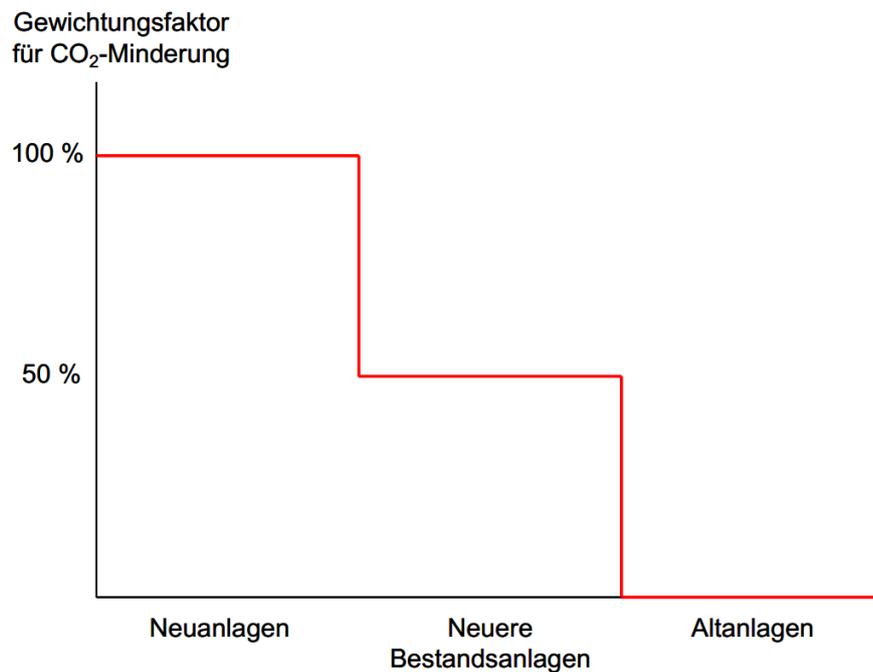


Abb. 5.2.: Abhängigkeit des Umrechnungsfaktors vom Alter von Biostromanlagen [Peh+08, S. 11]

auch selbst verbraucht und nicht in das öffentliche Netz einspeist.

5.2.4. Wärmeerzeugung

Bei der Herstellung der Energieträger, die zur Wärmeerzeugung in Frage kommen, wie z.B. Heizöl, Flüssiggas und Fernwärme, fallen länderspezifische Energieverbräuche an. Da jedem Land unterschiedliche Lieferländer für diese Energieträger zugewiesen sind, unterscheiden sich auch die Umrechnungsfaktoren von Land zu Land. [Kra11]

In Abbildung A.6 auf Seite 83 im Anhang sind exemplarisch Umrechnungsfaktoren für Erdgas dargestellt. Als Datenquelle wurde GEMIS verwendet. Analog zu den Umrechnungsfaktoren für elektrischen Strom kann hinsichtlich der Systemgrenzen zwischen der Art der berücksichtigten THG-Emissionen (lediglich CO₂ oder weitere THG) und zwischen direkten und indirekten Emissionen unterschieden werden.

5.2.5. Kältemittel

Sowohl beim Transport von Frachtgut als auch bei der Lagerhaltung ist gerade im Lebensmittelsektor eine Kühlung notwendig. Dabei gibt es hinsichtlich der Anwendung von Umrechnungsfaktoren zwei Möglichkeiten [Kra11]:

- Kommt es im Rahmen der Kühlung zum Verbrauch von Kraftstoff oder elektri-

schem Strom, können die jeweiligen Umrechnungsfaktoren für diese Energieträger verwendet werden (siehe Abschnitt 5.2.2 auf Seite 31 und Abschnitt 5.2.3 auf Seite 33). Eine Voraussetzung dazu ist natürlich die Erfassung der Mehrverbräuche, die durch die Kühlung entstehen.

- Benötigte Kältemittel haben meist ein hohes GWP und sind damit hoch klimawirksam. Die daraus resultierende Emission von CO₂-eq wird deshalb über einen weiteren Umrechnungsfaktor berechnet.

Dieser Umrechnungsfaktor ist massebezogen und setzt eine Erfassung der Kältemittelverluste, in der Regel beim Nachfüllen, voraus. In Abbildung A.7 auf Seite 84 im Anhang sind exemplarisch Umrechnungsfaktoren für wichtige Kältemittel dargestellt. Als Datenquelle wurde unter Anderem Ecoinvent verwendet. Die Unterschiede in den Systemgrenzen entsprechen erneut denen, der bereits vorgestellten Umrechnungsfaktoren.

5.3. Ermittlung des Energieverbrauchs im Straßenverkehr

In diesem Abschnitt werden zunächst wichtige Grundlagen aus der Fahrzeugphysik dargestellt. Anschließend folgt eine Ausführung gängiger Methoden und Formeln zur Berechnung des Energieverbrauchs im Straßenverkehr.

5.3.1. Grundlagen der Fahrzeugphysik

Bei der Fortbewegung eines Fahrzeugs müssen durch die Antriebskraft des Motors verschiedene Widerstände überwunden werden. Damit sind diejenigen Kräfte gemeint, die der Antriebskraft entgegen wirken. Durch die Addition dieser Kräfte ergibt sich der Gesamtwiderstand, der oft auch als Fahrwiderstand bezeichnet wird und aus den Komponenten des Roll-, Steigungs-, und des Luftwiderstandes besteht (siehe Formel 5.5). [Bra11]

$$F_W = F_R + F_{St} + F_L \quad (5.5)$$

wobei F_W Fahrwiderstand (in N)
 F_R Rollwiderstand (in N)
 F_{St} Steigungswiderstand (in N)
 F_L Luftwiderstand (in N)

Die einzelnen Widerstandsarten können differenzierter dargestellt werden. Aus den folgenden Formeln gehen die Einflussgrößen auf die Widerstandsarten hervor [Bra11, 34

5. Grundlagen zur Berechnung von THG-Emissionen

ff]:

$$F_R = \mu_R \cdot m \cdot g \quad (5.6)$$

$$F_{St} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (5.7)$$

$$F_L = c_w \cdot A \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \quad (5.8)$$

wobei μ_R Rollreibungskoeffizient
 m Masse des Fahrzeugs (in kg)
 g Erdbeschleunigung (in kg/s²)
 α Längsneigungswinkel der Straße (in °)
 c_w Luftreibungskoeffizient
 A Sitrnfläche des Fahrzeugs (in m²)
 ρ Dichte der Luft (in kg/m²)
 v Geschwindigkeit des Fahrzeugs (in m/s)

Neben dem Fahrwiderstand kann unter Anderem noch der Beschleunigungswiderstand berücksichtigt werden, der aus Formel 5.9 hervorgeht [Bra11, S. 34].

$$F_B = m \cdot a \quad (5.9)$$

wobei F_B Beschleunigungswiderstand (in N)
 m Masse des Fahrzeugs in (in kg)
 a Beschleunigung des Fahrzeugs (in m/s²)

Die Verbrauchsrate eines Motors kann über die Motorleistung, den Wirkungsgrad des Motors und den Heizwert des Kraftstoffes über Formel 5.10 bestimmt werden [Dal13, S. 2013]. Zu beachten ist, dass der Wirkungsgrad des Motors unter Anderem von der Drehzahl abhängig ist.

$$\dot{E}V = \frac{P}{H \cdot \eta} \quad (5.10)$$

wobei $\dot{E}V$ Verbrauchsrate (l/s)
 H Heizwert des Kraftstoffes (kJ/l)
 η Wirkungsgrad des Motors

Die Leistung ergibt sich aus dem Produkt der vom Antrieb aufzubringenden Kraft und der Geschwindigkeit. Außerdem ist ein Leistungsanteil zu berücksichtigen, der sich nicht auf die Bewegung des Fahrzeugs, sondern auf den Betrieb weiterer Verbraucher wie zum

5. Grundlagen zur Berechnung von THG-Emissionen

Beispiel der Lichtmaschine oder dem Radio bezieht. Dieser Leistungsanteil wird auch Betriebsleistung genannt. Die Berechnung geht nach [Dal13, S. 279] aus Formel 5.11 hervor.

$$P_{ges} = P_0 + v \cdot F \quad (5.11)$$

wobei P_{ges} Antriebsleistung (in Nm/s)

P_0 Betriebsleistung (in Nm/s)

F Antriebskraft (in N)

v Geschwindigkeit (in m/s)

5.3.2. Ermittlung des Energieverbrauchs ohne Detailkenntnisse

Soll der Energieverbrauch eines LKW berechnet werden, ohne dass Detailkenntnisse wie z.B. der Fahrzeugtyp, das Fahrzeuggewicht, der Kraftstoffverbrauch oder die Auslastung bekannt sind, kann auf Durchschnittswerte für den spezifischen Energieverbrauch zurückgegriffen werden. Dieser wird meist in Liter pro Tonnenkilometer angegeben und kann aus unterschiedlichen Quellen bezogen werden. Eine dieser Quellen sind die vom IFEU berechneten Werte, die als Datenbasis unter anderem das Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) und TREMOD beinhalten. Diese Durchschnittsdaten sind abhängig von gewichtsbezogenen Fahrzeugklassen im Frachtverkehr und der Art des transportierten Gutes. Dabei wird zwischen Volumengütern, Durchschnittsgütern und Massengütern unterschieden. Es wird eine durchschnittliche Auslastung und ein durchschnittlicher Leerfahrtenanteil in Abhängigkeit von der Art des Gutes zu Grunde gelegt. Des Weiteren wird zwischen verschiedenen Profilen der Längsneigung der Straße differenziert. Ein Auszug aus diesen Werten für den spezifischen Energieverbrauch ist in Abbildung A.8 auf Seite 85 im Anhang dargestellt. [Kra11]

Nachdem der spezifische Energieverbrauch pro Tonnenkilometer aus diesen Daten ermittelt wurde, kann der Energieverbrauch eines LKW durch Formel 5.12 berechnet werden [Kra11]:

$$EV = m \cdot D \cdot EV_{spez} \quad (5.12)$$

wobei EV Energieverbrauch (in l)

m Masse des transportierten Gutes (in t)

EV_{spez} Spezifischer Energieverbrauch (in l/t·km)

5.3.3. Ermittlung des Energieverbrauchs mit Detailkenntnissen

Liegen Detailkenntnisse über die in Abschnitt 5.3.2 unbekanntenen Eigenschaften eines Transportprozesses vor, sind in der Regel eigene Fahrzeuge im Einsatz, wie z.B. bei Logistikdienstleistern oder Unternehmen, die einen eigenen Werksverkehr betreiben. In diesem Fall wird unter Anderem von der Norm DIN EN 16258 empfohlen, eigene Messungen über den Energieverbrauch durchzuführen [DIN13b].

Wie der Energieverbrauch bezogen auf eine definierte Nutzlast aus solch einer Messung heraus berechnet werden kann, ist in Formel 5.13 zu sehen [Kra11, S. 133].

$$EV_{LKW(NL)} = \frac{EV_{LKW}}{D} \quad (5.13)$$

wobei $EV_{LKW(NL)}$ Energieverbrauch eines LKW bezogen auf eine Nutzlast (in l/km)
 EV_{LKW} gemessener Energieverbrauch mit der definierten Nutzlast (in l)
 D Distanz die bei der Messung zurückgelegt wurde (in km)

Durch das Ermitteln der Energieverbräuche für verschiedene Ladezustände eines LKW mit Hilfe von Messungen und Formel 5.13, kann die Verbrauchsermittlung auch für variable Beladungszustände stattfinden. Dazu wird Formel 5.14 verwendet.

$$EV_{LKW(m)} = (EV_{leer} + (EV_{voll} - EV_{leer}) \cdot \frac{m}{NL_{max}}) \cdot D \quad (5.14)$$

wobei $EV_{LKW(m)}$ Energieverbrauch eines LKW bezogen auf die Zuladung m (in l)
 EV_{leer} spezifischer Energieverbrauch des leeren LKW (in l/km)
 EV_{voll} spezifischer Energieverbrauch des LKW bei NL_{max} (in l/km)
 m Gewicht der Zuladung (in t)
 NL_{max} maximale Nutzlast (in t)
 D Distanz die bei dem Transport zurückgelegt wird (in km)

Sollen Leerfahrten mit in die Berechnung einfließen wie es z.B. durch die Norm DIN ISO 16258:2012 gefordert wird, ist zunächst der Leerfahrtenanteil zu bestimmen. Dazu können die Last- und Leerfahrten entfernungsbezogen betrachtet werden, wie es in Formel 5.15 nach [Kra11, S. 137] der Fall ist.

$$LF = \frac{\sum D_{Leerfahrten}}{\sum D_{Lastfahrten}} \quad (5.15)$$

5. Grundlagen zur Berechnung von THG-Emissionen

| | | |
|-------|-------------------|--|
| wobei | LF | Distanzbezogener Leerfahrtenanteil |
| | $D_{Leerfahrten}$ | Distanz die als Leerfahrt zurückgelegt wurde (in km) |
| | $D_{Lastfahrten}$ | Distanz die als Lastfahrt zurückgelegt wurde (in km) |

Der Energieverbrauch unter Berücksichtigung des Leerfahrtenanteils kann dann über eine Erweiterung von Formel 5.14 bestimmt werden (siehe Formel 5.16 nach [Kra11, S. 138])

$$EV_{LKW(m)} = (EV_{leer} + (EV_{voll} - EV_{leer}) \cdot \frac{m}{NL_{max}} + LF \cdot EV_{leer}) \cdot D \quad (5.16)$$

| | | |
|-------|---------------|--|
| wobei | $EV_{LKW(m)}$ | Energieverbrauch eines LKW bezogen auf die Zuladung m (l) |
| | EV_{leer} | spezifischer Energieverbrauch des leeren LKW (in l/km) |
| | EV_{voll} | spezifischer Energieverbrauch des LKW bei NL_{max} (in l/km) |
| | m | Gewicht der Zuladung (in t) |
| | NL_{max} | maximale Nutzlast (in t) |
| | D | Distanz, die bei dem Transport zurückgelegt wird (in km) |
| | LF | Leerfahrtenanteil |

5.3.4. Ermittlung des Energieverbrauchs bei LKW-Kühltransporten

Bei LKW-Transporten, die eine Kühlung des Frachtgutes erfordern, kommen oft Kältemaschinen zum Einsatz. Als Kältemaschine wird eine Maschine bezeichnet, "(...) die einem Stoff Wärme entzieht" [Rei08, S. 13]. Wegen des Energieerhaltungssatzes muss die entzogene Wärmeenergie aus einem niedrigen Temperaturniveau jedoch wieder an ein Kühlmedium abgegeben werden, wie z.B. Wasser oder Luft. Von einer Kältemaschine ist also die Anhebung des Energieniveaus von Medien zu leisten [Ihl06]. Der Transport der Wärmeenergie vom Kühlgut zum Kühlmedium wird durch das Kältemittel realisiert. Innerhalb einer Kältemaschine liegt in diesem Zusammenhang ein Kreisprozess vor, der auch „Carnot-Prozess“ genannt wird, und in dem fortlaufend Veränderungen des Zustands des Kältemittels stattfinden [Rei08, S. 38].

Die Energie, die für die Anhebung des Energieniveaus benötigt wird, ist bei LKW-Transporten zusätzlich zur für den Antrieb benötigten Energie aufzubringen. Diese benötigte Mehrleistung kann der Betriebsleistung des Fahrzeugs zugerechnet werden (siehe Formel 5.11). In der Regel erfolgt die Kühlung des Laderaums über eine Kältemaschine mit Hilfe eines Kältemittels. Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Kältemaschine mit Energie zu versorgen [Kra11]:

- Es wird ein Motorwagen mit Generator-Antrieb eingesetzt. Das Prinzip dabei ist, dass der Motor des Fahrzeugs gleichzeitig einen Generator antreibt der wiederum

5. Grundlagen zur Berechnung von THG-Emissionen

die Kältemaschine mit Strom versorgt. Bei Standzeiten des LKW muss bei dieser Technik entweder der Motor weiterlaufen, oder die Kältemaschine an eine externe Stromquelle, z.B. an einer Lagerrampe, angeschlossen werden.

- Es wird ein Motorwagen mit Diesel-Antrieb eingesetzt. Das bedeutet, dass neben dem Fahrzeugantrieb ein weiterer Dieselantrieb die Kältemaschine mit Energie versorgt. Der Kraftstoff für diesen Motor wird in der Regel aus dem Haupttank des LKW bezogen, d.h. es kommt durch die Kühlung zu einem höheren Dieserverbrauch. Bei Sattelaufliegern ist es auch üblich, einen weiteren Tank für die Kältemaschine zu installieren. Auch hier besteht die Möglichkeit der Kühlung über eine externe Stromquelle bei Standzeiten.

Eine weitere Möglichkeit zur Kühlung des Frachtraums sind Kryogensysteme. Dabei wird flüssiges Kohlendioxid (R744) über eine Verdampfungsanlage in den Laderaum abgegeben und nach Verbrauch seiner Kühlwirkung in die Außenluft abgelassen. Die für diese Art der Temperaturregelung benötigte Wärme stammt in der Regel aus dem Kühlkreislauf des Fahrzeugs. [Kra11]

Grundsätzlich ist der Energieverbrauch der Kühlung von den folgenden Faktoren abhängig [Kra11]:

- Dem Temperaturunterschied, der zwischen der Außentemperatur und der Temperatur im Inneren des Laderaums erreicht werden soll;
- Der Isolierung des Laderaums;
- Der Anzahl der Türöffnungen.

Da die Kühlung durch Kältemaschinen meist über ein Regelsystem erfolgt [Ihl06] und eine Kältemaschine bzw. der Generator, der sie mit Strom versorgt, nicht ununterbrochen in Betrieb sein müssen, ist zwischen zwei Zeitanteilen zu unterscheiden [Kra11]:

- Die Einsatzzeit bezeichnet den Zeitanteil, während dem die Kühlung aufrecht erhalten wird;
- Die Einschaltzeit bezeichnet den Zeitanteil, während dem die Kältemaschine bzw. der Generator aktiv in Betrieb ist.

Nach der Norm DIN EN 16258 sollte der Verbrauch eines LKW durch eine eigene Messung ermittelt werden [DIN13b]. Im Falle der Energieversorgung der Kältemaschine über einen Zusatztank, ist dies ohne großen Aufwand z.B. über das Führen eines Nachtankprotokolls möglich. Erfolgt die Energieversorgung aber durch Kraftstoff aus dem Haupttank des LKW, ist die Ermittlung des Mehrverbrauchs durch die Kühlung schwieriger. Sie kann z.B. über Vergleichsfahrten mit und ohne aktive Kühlung oder durch einen Durchflussmengenmesser am Generator, der die Kältemaschine mit Strom versorgt, realisiert werden. Bei der Messung werden so Durchschnittswerte für den spezifischen Energieverbrauch von

5. Grundlagen zur Berechnung von THG-Emissionen

Kraftstoff bzw. Strom ermittelt und bezogen auf die Einsatzzeit der Kältemaschine angegeben. Die Berechnung des Energieverbrauches ist bei Bekanntheit des spezifischen Energieverbrauches mit der Formel 5.17 möglich. [Kra11]

$$EV_{K\u00fchlung} = EV_{Zeit} \cdot ZE \quad (5.17)$$

wobei $EV_{K\u00fchlung}$ zusätzlicher Energieverbrauch (in l oder kWh)

EV_{Zeit} spezifischer Energieverbrauch der Kältemaschine (in l/h oder kWh/h)

ZE Einsatzzeit der Kältemaschine (in h)

Außerdem ist bei der Berechnung der durch die Kühlung verursachten THG-Emissionen das in die Umwelt austretende Kältemittel mit einzubeziehen. Kältemittelverlust tritt besonders durch Leckagen im Kühlsystem auf, die z.B. durch Verschleiß oder Beschädigungen hervorgerufen werden können. Dabei ist die Klimawirksamkeit des Kältemittels von großer Bedeutung, da sie den Umrechnungsfaktor zur Berechnung der CO₂-eq maßgeblich bestimmt (siehe Abschnitt 5.2.5 auf Seite 36). Der Umrechnungsfaktor geht zur Berechnung der CO₂-eq in Formel 5.18 ein [Kra11, S. 112]:

$$EM_{THG} = F_{THG} \cdot KV \quad (5.18)$$

wobei EM_{THG} THG-Emission (in CO₂-eq)

F_{THG} Umrechnungsfaktor (in CO₂-eq/kg)

KV Kältemittelverlust (in kg)

Das GHG-Protokoll empfiehlt den sogenannten “Life Cycle Approach” zur Ermittlung der Kältemittelverluste. Dabei wird der spezifische Verbrauch von Kältemitteln über die Nachfüllmenge bezogen auf einen definierten Zeitabschnitt ermittelt [WRI13].

5.4. Ermittlung des Energieverbrauches der Lagerung

Grundsätzlich trifft die Aussage zu, dass der Energiebedarf bei stationären Prozessen in Gebäuden und Lagern von Einrichtung zu Einrichtung sehr variabel ist. Die wichtigsten Energie- und damit in der Regel auch THG-Emissionstreiber sind Förderanlagen in Hochregallagern, Sortieranlagen in Paketzentren und Kühl- und Tiefkühlbereiche in Lagern, die eine Kühlung der gelagerten Güter sicherstellen. Die Norm DIN EN 16258, auf die sich im Großteil dieses Kapitels bezogen wird, sieht keine Ermittlung der THG-Emissionen von stationären Anlagen vor. In der Regel werden Energieverbräuche für Strom und Wärme durch Ablesen der jeweiligen Zählerstände oder anhand der Jahresabrechnung des Energieversorgers ermittelt. [Kra11]

Da keine Formeln zur Berechnung der stationären Energiebedarfe vorliegen, die dem An-

spruch genügen, aus ihnen THG-Parameter für den weiteren Verlauf der Arbeit abzuleiten, wird in diesem Kapitel der Schwerpunkt auf die Einflussfaktoren der Energiebedarfe gelegt. Das bedeutet, es werden physikalische Grundlagen und Formeln dargestellt, die indirekt in die Berechnung des Energieverbrauches eingehen.

5.4.1. Der Kältebedarf

Um im weiteren Verlauf der Arbeit die Parameter identifizieren zu können, von denen die Funktion der Kühlung abhängt, wird in diesem Abschnitt auf den Kältebedarf eingegangen. Dabei handelt es sich um die Wärmeenergie, die einem zu kühlenden Bereich entzogen werden muss, um ihn auf eine niedrigere Temperatur herunterzukühlen. Da der Kältebedarf als indirekter Verursacher von Energieverbräuchen durch Kühlung gesehen werden kann, werden im Folgenden die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Kältebedarf nach [ASH98] erläutert.

Die Ursachen des - bzw. Einflüsse auf den Kältebedarf werden in der folgenden Aufzählung genannt [ASH98]:

- Der Transmission Load bezeichnet, den Wärmestrom durch die Begrenzungsflächen des Kühlraums, wie Decken, Wände und Böden;
- Der Product Load bezeichnet den Wärmestrom der von dem gekühlten Gut ausgeht;
- Der Internal Load bezeichnet den Wärmestrom der von elektrischen Verbrauchern oder Personen innerhalb des Kühlraums ausgeht;
- Der Infiltration Air Load bezeichnet den Wärmestrom der aus einem Luftaustausch zwischen Kühlraum und Umgebung z.B. durch Türöffnungen resultiert;
- Der Equipment Load bezeichnet den Wärmestrom der durch das Equipment zur Kühlung selbst hervorgerufen wird.

Der Transmission Load kann über die Formeln 5.19 und 5.20 berechnet werden [ASH98]. Er ist unter Anderem abhängig vom Flächeninhalt der Begrenzungsflächen, der Wanddicke, dem Wandmaterial und der Temperaturdifferenz des Kühlraums zur Umgebung.

$$q_{Trans} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (5.19)$$

$$U = \frac{1}{1/h_j + x/k + 1/h_o} \quad (5.20)$$

5. Grundlagen zur Berechnung von THG-Emissionen

| | | |
|-------|-------------|--|
| wobei | q_{Trans} | Wärmestrom durch die Begrenzungsflächen (in W) |
| | U | Wärmetransferkoeffizient (in W/(m ² K)) |
| | A | Flächeninhalt der Begrenzungsflächen (in m ²) |
| | ΔT | Temperaturdifferenz zwischen Kühlraum und Umgebung (in °C) |
| | h_i | Wärmeleitfähigkeit der inneren Begrenzungsfläche (in W/(m ² K)) |
| | h_o | Wärmeleitfähigkeit der äußeren Begrenzungsfläche (in W/(m ² K)) |
| | x | Wanddicke (in m) |
| | k | Wärmeleitfähigkeit des Wandmaterials (in W(m K)) |

Der Product Load ist abhängig von verschiedenen Energieanteilen, die bei der Kühlung entstehen. Soll ein Produkt auf eine niedrigere Temperatur heruntergekühlt werden, die über seinem Gefrierpunkt liegt, kann zur Berechnung der zu entziehenden Wärmeenergie Formel 5.21 verwendet werden. Die zu entziehende Wärmeenergie zur Kühlung eines Produktes auf seinen Gefrierpunkt geht aus Formel 5.22 hervor, die Wärmeenergie des eigentlichen Gefrierens aus 5.23 und die Wärmeenergie zum Herunterkühlen eines Produktes von seinem Gefrierpunkt auf ein noch niedrigeres Temperaturniveau aus Formel 5.24. [ASH98]

$$Q_1 = m \cdot c_1(t_1 - t_2) \tag{5.21}$$

$$Q_2 = m \cdot c_1(t_1 - t_f) \tag{5.22}$$

$$Q_3 = m \cdot h_{if} \tag{5.23}$$

$$Q_4 = m \cdot c_2(t_f - t_3) \tag{5.24}$$

| | | |
|-------|-------------|--|
| wobei | $Q_1 - Q_4$ | Entzogene Wärmeenergie (in kJ) |
| | m | Masse des Produktes (in kg) |
| | c_1 | spezifische Wärmekapazität des Produktes oberhalb seines Gefrierpunktes (in kJ/kg·K) |
| | t_1 | Eingangstemperatur des Produktes oberhalb seines Gefrierpunktes (in °C) |
| | t_2 | Zieltemperatur des Produktes oberhalb seines Gefrierpunktes (in °C) |
| | t_3 | Zieltemperatur des Produktes unterhalb seines Gefrierpunktes (in °C) |
| | t_f | Gefrierpunkt des Produktes (in °C) |
| | h_{if} | Die massebezogene Umwandlungswärme des Produktes (kJ/kg) |

5. Grundlagen zur Berechnung von THG-Emissionen

Der aus diesen Energieanteilen resultierende Wärmestrom bei der Kühlung eines Produktes unter seinen Gefrierpunkt kann über Formel 5.25 berechnet werden.

$$q_{prod} = \frac{Q_2 + Q_3 + Q_4}{3600 \cdot n} \quad (5.25)$$

q_{prod} Wärmestrom des Kühlgutes (in kW)

n Kühlzeit (in h)

Der Internal Load resultiert aus elektrischer Energie, die innerhalb des Kühlraums verbraucht wird, z.B. durch Beleuchtung oder Motoren, sowie durch von Personen ausgestrahlte Wärme. In diesem Zusammenhang spricht man auch von Wärmeäquivalenten. [ASH98]

Der Infiltration Air Load, also der aus dem Luftaustausch des Kühlraums mit der Umgebung resultierende Wärmestrom, ergibt sich unter anderem aus den Dichteunterschieden der Luft verschiedenen Räumen. Die Formel 5.26 dient zur Ermittlung dieses Wärmestromanteils, wobei mit Formel 5.27 der Zeitanteil berechnet werden kann, in dem eine Tür zwischen dem Kühlraum und einem Raum außerhalb geöffnet ist. [ASH98]

$$q_{air} = V \cdot A(h_i - h_r)\rho_r \cdot D_t \quad (5.26)$$

$$D_t = \frac{P \cdot \Theta_p + 60 \cdot \Theta_o}{3600 \cdot \Theta_d} \quad (5.27)$$

q_{air} Wärmestrom durch Luftaustausch (in kW)

V Durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit der Luft (in m/s)

A Fläche der Türöffnungen (in m²)

h_i Enthalpie der einströmenden Luft (in kJ/kg)

h_r Enthalpie der Kühlraumluft (in kJ/kg)

ρ_r Dichte der Kühlraumluft (in kg/m³)

D_t Zeitanteil in dem die Türen geöffnet sind

P Anzahl der Türöffnungen

Θ_p Zeitraum der Türöffnung und Schließung (in s)

Θ_o Zeitraum in dem die Türöffnung offen steht (in min)

Θ_d Gesamtzeit des Betrachtungszeitraums (in h)

Neben den Einflussfaktoren auf den Kältebedarf ist bei der Identifizierung der THG-Parameter für den Prozess der Lagerung der Kältemittelverlust analog zu Abschnitt 5.3.4 auf Seite 41 einzubeziehen.

5.4.2. Strom und Wärme

Die Norm DIN EN 16258, auf die sich im Großteil dieses Kapitels bezogen wird, sieht keine Ermittlung der THG-Emissionen von stationären Anlagen vor. In der Regel werden Energieverbräuche für Strom und Wärme durch Ablesen der jeweiligen Zählerstände oder anhand der Jahresabrechnung des Energieversorgers ermittelt. Wegen dem in Kapitel 4 auf Seite 26 gelegten Fokus auf die Kühlung innerhalb eines Lagers, werden die Parameter die sich auf den Stromverbrauch aus Beleuchtung und den Heizbedarf beziehen an dieser Stelle nicht weiter differenziert.

6. Aufschlüsselung der THG-Parameter

In diesem Kapitel wird zunächst eine kurze Eingrenzung des Parameterbegriffes vorgenommen. Dann erfolgt eine Zusammenfassung der THG-Parameter aus der in Kapitel 5 auf Seite 30 geschaffenen Informationsgrundlage über die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Emission von THG.

6.1. Der Parameterbegriff

In einer Definition aus der Mathematik wird mit dem Begriff des Parameters eine Variable bezeichnet, die “beliebig, aber fest” ist [BMM05, S. 11]. Das bedeutet, dass ein Parameter bei der Betrachtung eines definierten Falls konstant ist, jedoch über mehrere betrachtete Fälle hinweg variieren kann.

In der DIN Norm 1319-1 zu den Grundbegriffen der Messtechnik wird mit dem Begriff Parameter eine

“Größe, die nicht Gegenstand der Messung ist, jedoch die Messgröße oder die von der Messeinrichtung gelieferte Information über den Messwert beeinflusst”[DIN95, S. 7],

bezeichnet, wobei der Begriff der Einflussgröße synonym verwendet wird.

Im Bereich der Simulationstechnik wird der Begriff Parameter oft für die Einflussgrößen innerhalb eines Simulationsmodells benutzt. Durch sie können Simulationsmodelle an die realen Systeme angepasst werden, die ihnen zu Grunde liegen. Dabei bleibt die Grundaussage der mathematischen Definition erhalten, dass die Parameter nicht Gegenstand der Messung innerhalb eines Simulationsdurchlaufes sind und somit bezogen auf einen Simulationsdurchlauf feste Größen darstellen. Zwischen unterschiedlichen Simulationsdurchläufen können sie aber verändert werden. Dies spiegelt den Aspekt der beliebigen Größe wieder. [SV13]

Ein auf diese Arbeit bezogenes Beispiel dieser Definition des Parameterbegriffes ist die Simulation der Höhe von THG-Emissionen in einem Simulationsmodell des Frachtguttransportes über die Straße. Als Parameter können Größen wie die Beladung oder der spezifische Energieverbrauch eines LKW auftreten, die gemessene Größe könnte der absolute Energieverbrauch sein, der dann durch einen weiteren Parameter, den Umrechnungs-

6. Aufschlüsselung der THG-Parameter

faktor, in CO₂-eq umgerechnet wird.

Aus diesen Überlegungen heraus wird in dieser Arbeit zwischen den folgenden Begriffen unterschieden:

- Ein Parameter ist eine Einstellgröße zur Anpassung der Eigenschaften eines Modells an Zustände des realen System, auf dem das Modell basiert.
- Ein THG-Parameter ist ein Parameter, der die Höhe der THG-Emissionen innerhalb eines Systems beeinflusst.

6.2. THG-Parameter aus den Systemgrenzen der Umrechnungsfaktoren

Aus der Darstellung der Ermittlung von Umrechnungsfaktoren für Kraftstoffe, elektrischen Strom, Wärmeerzeugung und Kältemittel lässt sich ein wiederkehrendes Muster hinsichtlich der Unterscheidungskriterien der einzelnen Umrechnungsfaktoren erkennen (siehe Abschnitt 5.2 auf Seite 30). Bei allen Umrechnungsfaktoren treten die folgenden Unterscheidungskriterien auf:

- Art der berücksichtigten Emissionen: Berücksichtigung von CO₂-Emissionen (direkte Emissionen) vs. Berücksichtigung von CO₂-eq (direkte und indirekte Emissionen);
- Berücksichtigung der Energievorkette: Die Energievorkette wird berücksichtigt (WTW) vs. die Energievorkette wird nicht berücksichtigt (TTW);
- Außerdem sind die Umrechnungsfaktoren abhängig vom Betrachtungsland und dem Betrachtungszeitraum.

6.3. THG-Parameter des Transportprozesses in der Distributionslogistik

In diesem Abschnitt werden die in Kapitel 5 auf Seite 30 auftretenden Einflussgrößen auf die THG-Emissionen im Frachtgutverkehr auf der Straße aufgeschlüsselt und zwecks einer übersichtlichen Darstellung nach verschiedenen Kategorien sortiert. Die Kategorien wurden dabei nach der Ursache des jeweiligen Parameters gewählt. In diese Kategorien gehen sowohl die Parameter aus den Grundlagen der Fahrzeugphysik (Abschnitt 5.2 auf Seite 30) also auch die aus den Normen zur Berechnung des Energieverbrauchs (Abschnitt 5.3 auf Seite 37) ein.

6.3.1. Herleitung der THG-Parameter

Das Aufstellen eines Kräftegleichgewichtes ist eine Möglichkeit, die Kraft zu ermitteln, die vom Antrieb eines LKW mindestens aufgebracht werden muss, damit sich das Fahrzeug vorwärts bewegt. Anders ausgedrückt kann man auch von einem Zustand sprechen, in dem der LKW ruht, da sich die wirkenden Kräfte gegenseitig eliminieren. Dabei wirken die Komponenten des Fahrwiderstandes und der Beschleunigungswiderstand der Antriebskraft entgegen. Eine schematische Darstellung des daraus resultierenden Kräftegleichgewichtes ist in Abbildung 6.1 zu sehen. Dabei wurden dynamische Komponenten wie z.B.

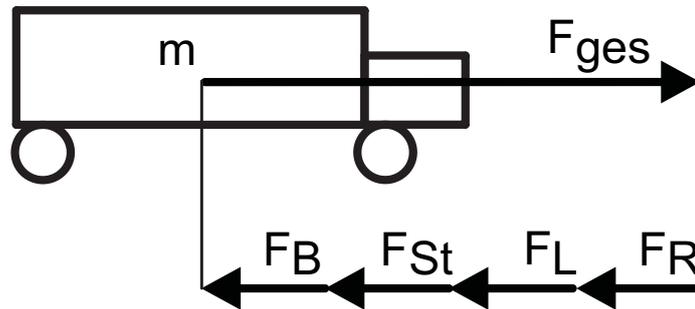


Abb. 6.1.: Kräftegleichgewicht am ruhenden LKW

die Achsverschiebung bei Steigungen, oder weitere Komponenten der Fahrdynamik, wie sie z.B. in der DIN Norm 8855 [DIN13a] definiert werden, nicht berücksichtigt.

Setzt man für die einzelnen Komponenten in diesem Gleichgewichtszustand (siehe Formel 6.1) die Formeln 5.6, 5.7, 5.8 und 5.9 ein, erhält man die Gleichung aus Formel 6.2.

$$F_{ges} = F_R + F_L + F_{St} + F_B \quad (6.1)$$

$$F_{ges} = \mu_R \cdot m \cdot g + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \sin\alpha + m \cdot a \quad (6.2)$$

Formel 6.2 kann durch einige Äquivalenzumformungen (Einsetzen des Produktes aus Masse m und Gesamtbeschleunigung a_{ges} für die Gesamtkraft F_{ges} , sowie Division der Masse m auf beiden Seiten der Gleichung) in die Differentialgleichung in Formel 6.3 umgeformt werden.

$$a_{ges} = \mu_R \cdot g + \frac{1}{2 \cdot m} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot v^2 + g \cdot \sin\alpha + a \quad (6.3)$$

Aus dieser kompakten Darstellung lassen sich leicht die für die Gesamtbeschleunigung relevanten Parameter ablesen. Die Formel 6.3 wird dann in Formel 5.10 eingesetzt, um die Parameter der Verbrauchsrate in einer kompakten Darstellung zu erhalten (siehe Formel 6.4).

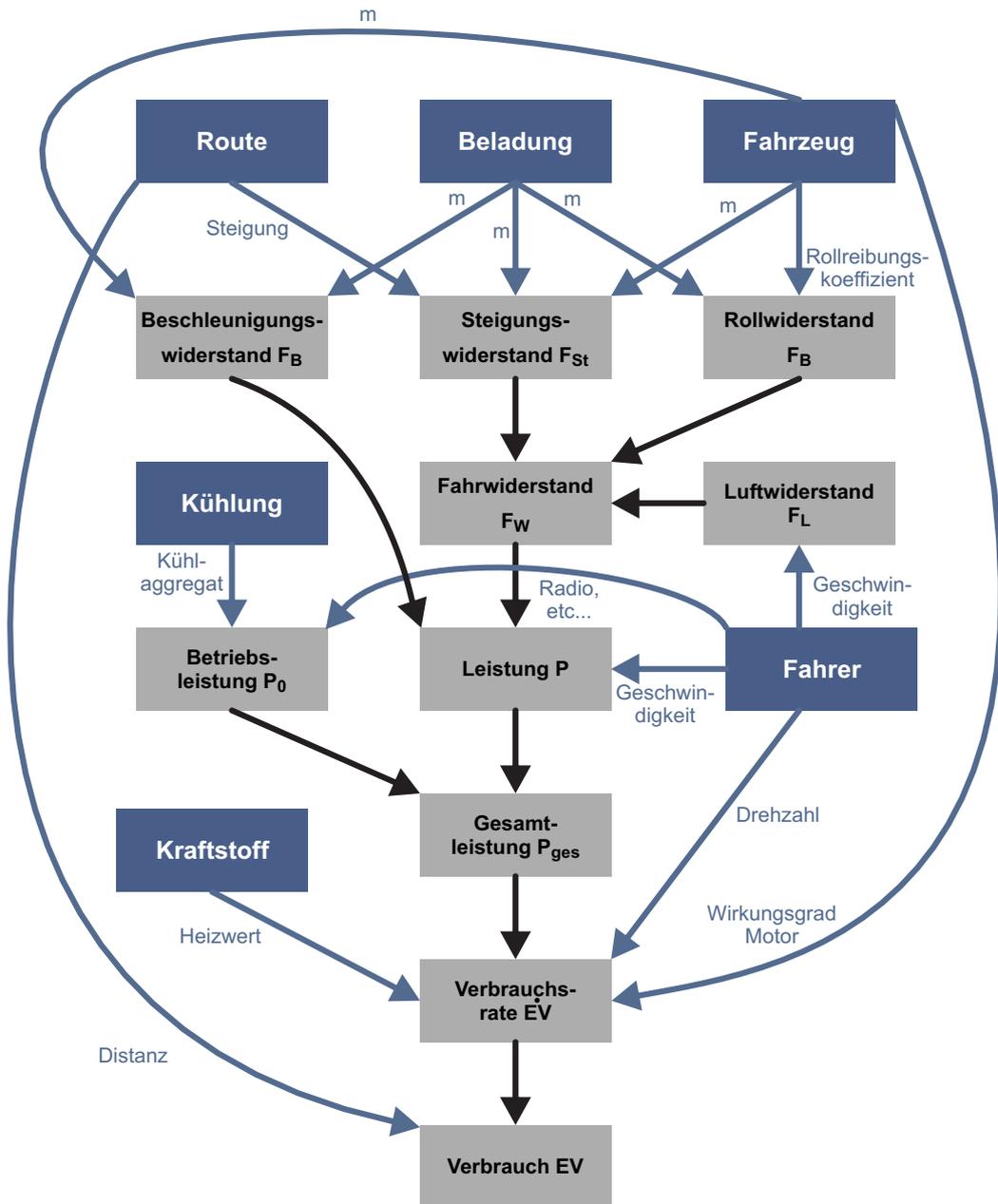
6. Aufschlüsselung der THG-Parameter

$$E\dot{V} = \frac{P_0 + (\mu_R \cdot m \cdot g + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \sin\alpha + m \cdot a) \cdot v}{H \cdot \eta} \quad (6.4)$$

Durch Integration könnte man nun eine Formel für den streckenbezogenen Energieverbrauch herleiten. Darauf wird an dieser Stelle verzichtet, da mit Formel 5.16 eine solche bereits vorliegt und Formel 6.4 lediglich dazu dient, die physikalischen Parameter auf die Verbrauchsrate abzuleiten.

Die Informationen, die aus der Herleitung von Formel 6.4 hervorgegangen sind, werden nun in einer Graphik veranschaulicht. Es werden die Abhängigkeiten, die aus den einzelnen Einsetzungen und Äquivalenzumformungen ersichtlich wurden, in Form von Pfeilen dargestellt. Außerdem werden die physikalischen Sachverhalte Kategorien zugeordnet, die sich am jeweiligen Verursacher orientieren. Die Graphik ist in Abbildung 6.2 zu sehen.

6. Aufschlüsselung der THG-Parameter



$$\dot{EV} = \frac{P_0 + (\mu_R \cdot m \cdot g + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \sin\alpha + m \cdot a) \cdot v}{H \cdot \eta}$$

$$EV_{LKW(m)} = (EV_{leer} + (EV_{voll} - EV_{leer}) \cdot \frac{m}{NL_{max}} + LF \cdot EV_{leer}) \cdot D$$

Abb. 6.2.: Schematische Darstellung der Abhängigkeiten und Parameter der Verbrauchsrate und des Energiverbrauchs eines LKW

6.3.2. Zusammenfassung der THG-Parameter des Transportprozesses

In der folgenden Aufzählung werden die THG-Parameter des Transports nach den Kategorien aus dem vorherigen Abschnitt zusammengefasst. Dabei werden nur Parameter berücksichtigt, die auch als Einstellgröße dienen können. Dies trifft z.B. nicht auf die Dichte der Luft ρ zu. Die Parameter werden bezüglich ihrer Ausprägungen unabhängig von der physikalischen Formeln beschrieben:

- Route
 - Die Transportdistanz D beschreibt die Entfernung, die ein LKW während eines Transportprozesses zurücklegt (Einheit: m).
 - Der Straßenlängsneigungswinkel α beschreibt die Steigung, die ein LKW auf einem Teilabschnitt eines Transportprozesses überwinden muss (Einheit $^\circ$).
- Beladung
 - Die Masse m der Zuladung (Einheit t) beschreibt die Masse der transportierten Fracht.
 - Das Volumen V der Zuladung beschreibt das Gesamtvolumen der transportierten Fracht. (Einheit m^3).
- Fahrzeug
 - Die Leermasse m_{leer} des Fahrzeugs bezeichnet die Masse des Fahrzeugs ohne Zuladung (Einheit t).
 - Die zulässige Gesamtmasse m_{ZGM} des Fahrzeugs beschreibt die Summe aus Leermasse und der Masse der Zuladung (Einheit t)
 - Die maximale Nutzlast NL_{max} des Fahrzeugs bezeichnet die maximale Masse der Zuladung, sodass die zulässige Gesamtmasse nicht überschritten wird (Einheit t).
$$m_{ZGM} = m_{leer} + NL_{max}$$
 - Der Wirkungsgrad des Motors η beschreibt, welchen Anteil der Energie des verbrauchten Kraftstoffes der Motor in Antriebskraft umwandeln kann. Er ist unter Anderem abhängig von der Drehzahl des Motors.
 - Der Luftwiderstandsbeiwert c_w beschreibt den dimensionslosen Kennwert des Strömungswiderstandes eines Körpers. Er ist unter Anderem abhängig von der Geschwindigkeit und der Stirnfläche des Körpers.
 - Der Rollreibungskoeffizient μ_R beschreibt den Kennwert des Rollwiderstandes eines Körpers. Er tritt beim Frachtguttransport am Reifen des LKW auf.

6. Aufschlüsselung der THG-Parameter

- Fahrer
 - Die Geschwindigkeit v des Fahrzeugs wird durch den Fahrer bestimmt und geht sowohl über den Luftwiderstand, als auch über den dynamischen Leistungsanteil in die Berechnung der Verbrauchsrate ein (Einheit m/s).
 - Die Anzahl und Intensität der Beschleunigungsvorgänge während eines Transportprozesses geht in die Berechnung der Verbrauchsrate über den Beschleunigungswiderstand ein, der bei jedem Beschleunigungsvorgang zu überwinden ist.
- Kraftstoff
 - Der Heizwert H des Kraftstoffes beschreibt die bei der Verbrennung maximal nutzbare Wärmeenergie (kJ/kg). Dieser Parameter geht in die Berechnung der Verbrauchsrate ein.

6.4. THG-Parameter des Lagerprozesses in der Distributionslogistik

Analog zu Abschnitt 6.3 auf Seite 49 werden in diesem Abschnitt die Einflussgrößen auf die Kühlung während des Lagerprozesses zusammengefasst.

- Kühlung
 - Die Temperaturdifferenz ΔT bezeichnet den Unterschied zwischen der Kühlraumtemperatur und der Umgebungstemperatur (Einheit °C);
 - Der Wärmetransferkoeffizient U bezeichnet die Leitfähigkeit von Grenzflächen für Wärmeenergie. Er geht aus dem Material und der Dicke der Wände, Decken und Böden hervor, die den Kühlraum begrenzen.
 - Der Flächeninhalt A_{ges} bezeichnet den Gesamtflächeninhalt der Begrenzungsflächen des Kühlraums (Einheit m²);
 - Die Masse m_{prod} bezeichnet die Masse der Kühlgüter (Einheit kg);
 - Die Kühlzeit n bezeichnet die Zeit, die ein Kühlgut bis zum Erreichen der Solltemperatur gekühlt werden muss (Einheit h)
 - Die Fläche $A_{Tür}$ bezeichnet die Fläche der Türöffnungen, die an einen Kühlraum grenzen (Einheit m²);
 - Die Anzahl P bezeichnet die Anzahl der Türöffnungen eines Kühlraums;
 - D_t bezeichnet den durchschnittlichen Zeitanteil, in dem die Türen eines Kühlraums geöffnet sind;

7. Entwicklung der KPI

Nachdem in Kapitel 6 auf Seite 48 die Parameter identifiziert wurden, die innerhalb den Systemgrenzen dieser Arbeit einen Einfluss auf den Ausstoß von THG-Emissionen bezüglich der Logistikprozesse Transport und Lagerung haben und gleichzeitig als Einstellgröße dienen können, werden in diesem Kapitel aus diesen Parametern KPI zur Senkung von THG-Emissionen gebildet.

7.1. Strukturierungssystematik

Grundsätzlich wird bei der Klassifizierung von KPI von zwei Ebenen ausgegangen. Die KPI der ersten Ebene beziehen sich direkt auf das Oberziel, die Emission von THG zu senken. Die KPI der zweiten Ebene beziehen sich auf Parameter, die die Emission von THG beeinflussen. Sie messen daher die Leistung bezüglich der Erreichung des Oberziels anhand der Erreichung von Unterzielen. Dabei werden insbesondere KPI betrachtet, die die Effizienz von Prozessen bzgl. der Senkung von THG bewerten.

Außerdem ist zwischen verschiedenen Arten der Allokation zu unterscheiden. Effektivitäts-KPI aus der ersten Ebene werden auf Objekte bezogen, die Gegenstand der Prozesse innerhalb des Distributionsnetzes sind, wie z.B. definierte Mengen eines Produktes. In diesen Bereich kann auch der PCF eines Produktes eingeordnet werden. Effizienz-KPI beziehen sich auf eine Größe, anhand derer die Leistung eines Prozesses beurteilt werden kann, wie z.B. die THG-Emissionen pro Liter Diesel. In dieser Arbeit wird der Fokus auf diejenigen KPI gelegt, anhand derer die Effizienz der betrachteten Logistikprozesse bzgl. der Senkung von THG-Emissionen gemessen werden kann.

7.2. KPI des Transportprozesses

Die Kategorisierung der KPI für den Transportprozess ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Durch eine Verbesserung der Transporteffizienz, soll eine Verbesserung der Transporteffektivität bzgl. der Reduzierung von THG-Emissionen erreicht werden.

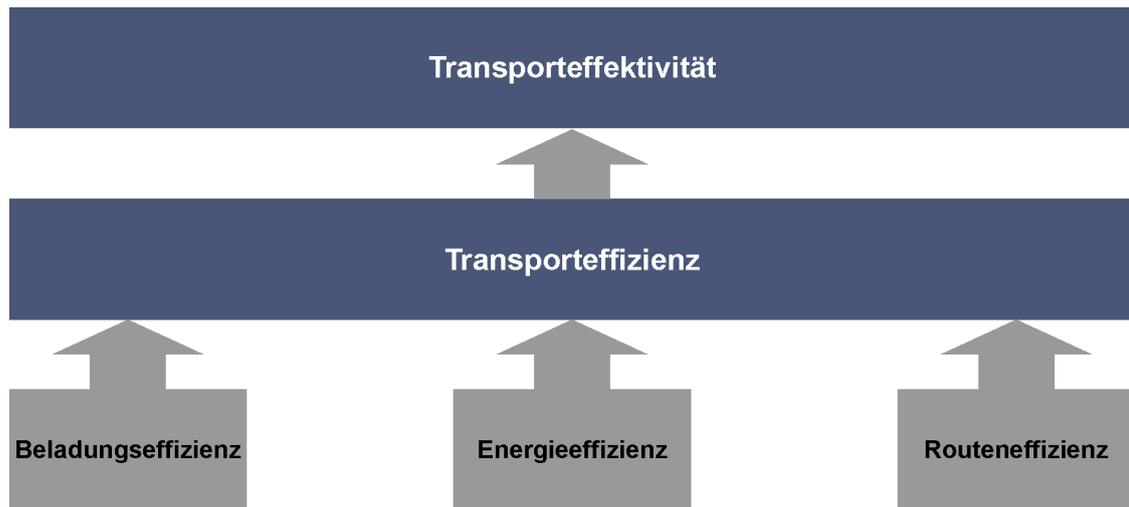


Abb. 7.1.: Kategorisierung der KPI für den Transportprozess

7.2.1. Der KPI Transporteffizienz

Die Effizienz eines Transportprozesses bezüglich seine Beitrags zum Carbon Footprint kann durch das Verhältnis des Energieverbrauchs zu der zurückgelegten Distanz multipliziert mit der Masse der transportierten Fracht dargestellt werden (siehe Formel 7.1). Diese Darstellung entspricht der Vorgehensweise zur Ermittlung des spezifischen Energieverbrauchs eines LKW ohne Detailkenntnisse (siehe Abschnitt 5.3.2 auf Seite 39, Formel 5.12).

$$TE_{EV} = \frac{EV}{m \cdot D} \quad (7.1)$$

wobei TE_{EV} Energieverbrauchsbezogene Transporteffizienz (in l/tkm)

EV Energieverbrauch (in l)

m Masse der Zuladung (kg)

D Transportdistanz (km)

Die emittierten CO₂-eq können dann über einen geeigneten Umrechnungsfaktor ermittelt werden (siehe Abschnitt 5.1 auf Seite 30). Daraus ergibt sich der in Tabelle 7.1 dargestellte KPI.

In den folgenden Abschnitten werden die Effizienzkatgorien vorgestellt, die die Transporteffizienz beeinflussen.

7. Entwicklung der KPI

| Transporteffizienz | |
|---|--|
| $TE_{EM} = \frac{F_{CO_2} \cdot EV}{m \cdot D}$ | TE_{EM} Transporteffizienz (in kgCO ₂ -eq/tkm) |
| | F_{CO_2} CO ₂ -Umrechnungsfaktor (in kgCO ₂ -eq/l) |
| | EV Energieverbrauch (in l) |
| | m Masse der Zuladung (in kg) |
| | D Transportdistanz (in km) |
| Handlungsauftrag | |
| <ul style="list-style-type: none"> • wenig konkret • Prüfung von Potentialen bei Beladungseffizienz, Energieeffizienz und Routeneffizienz | |
| Sonstiges | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Sollte nicht isoliert betrachtet werden, da die Struktur des Fuhrparks nicht mit einbezogen wird und kein konkreter Handlungsauftrag ersichtlich ist; In Zusammenhang mit den anderen KPI der Beladungseffizienz, insbesondere der Auslastungsquote, zu betrachten. | |

Tab. 7.1.: Der KPI Transporteffizienz

7.2.2. KPI der Beladungseffizienz

Die Gleichung für die Transport-Effizienz wird unter Anderem von der Distanz bestimmt, die über einen Betrachtungszeitraum innerhalb der Transportprozesse zurückgelegt wird. Um diesen Parameter zu minimieren kann im Sinne der Routen-Effizienz eine Verkürzung der zu überwindenden Teilabschnitte zwischen Knotenpunkten innerhalb einer Supply Chain vorgenommen werden (siehe Abschnitt 7.2.5 auf Seite 66). Es ist aber auch ein anderer Ansatz denkbar, nämlich Transportprozesse von Vorneherein zu vermeiden. Das bedeutet, dass bei einer konstanten Gesamtmenge transportierter Güter, die Auslastung der einzelnen Fahrzeuge erhöht wird oder aber größere Fahrzeuge eingesetzt werden.

Der KPI der Fahrzeug-Effizienz zeigt in diesem Zusammenhang die über einen Betrachtungszeitraum hinweg geleisteten Tonnenkilometer bezogen auf einen einzelnen Transportprozess an. Er ist in Tabelle 7.2 dargestellt.

Die Fahrzeug-Effizienz kann durch eine Verringerung der Transportprozesse verbessert werden. Dazu kann einerseits versucht werden die Auslastungsquote zu erhöhen und dafür bei gleichbleibender Gesamttransportmenge den Fuhrpark zu verkleinern. Liegt bereits eine hohe Auslastung vor kann andererseits eine strukturelle Veränderung des Fuhrparks hin zu größeren Nutzlasten geprüft werden.

Die durchschnittliche Auslastung von Transportprozessen über einen Betrachtungszeitraum hinweg kann durch die Auslastungsquote beschrieben werden. Bezogen auf einen

7. Entwicklung der KPI

| Fahrzeugeffizienz | |
|--|---|
| $FE = \frac{m \cdot D}{TP}$ | <i>FE</i> KPI: Fahrzeug-Effizienz (in tkm) |
| | <i>m</i> Masse der Zuladung (in kg) |
| | <i>D</i> Transportdistanz (in km) |
| | <i>TP</i> Anzahl der Transportprozesse bzw. Fahrzeuge |
| Handlungsauftrag | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Optimierungspotential über die Größe und Nutzlast der Fahrzeuge • Prüfen ob eine Verkleinerung des Fuhrparks bei gleichzeitiger Erhöhung der Auslastungsquote möglich ist | |
| Sonstiges | |
| <ul style="list-style-type: none"> • In Zusammenhang mit den anderen KPI der Beladungseffizienz, insbesondere der Auslastungsquote, betrachten. | |

Tab. 7.2.: Der KPI Fahrzeugeffizienz

Transportprozess ist sie das Verhältnis aus der Masse der Zuladung zu der maximalen Nutzlast und geht als Komponente in viele der in Kapitel 5 auf Seite 30 vorgestellten Berechnungsmethoden ein, unter anderem in Formel 5.14. Die Auslastungsquote als KPI der Beladungseffizienz ist in Tabelle 7.3 dargestellt.

Eine geringe Auslastungsquote bei Fahrten mit Last kann zu unnötig vielen Transportprozessen führen. Eine Fahrt ohne Last, eine sogenannte Leerfahrt, ist hingegen bezüglich des Ziels des Transportprozesses, Frachtgut von einem Ort zum anderen zu transportieren, als Verschwendung anzusehen, da keine Fracht, sondern lediglich das Fahrzeug selbst transportiert wird. Leerfahrten resultieren in der Regel aus der Schwierigkeit Materialflüsse in entgegengesetzte Richtungen zu organisieren [ME10]. Gerade im grenzüberschreitenden Werkverkehr liegt ein hoher Anteil an Leerfahrten vor, da es Unternehmen nicht immer gelingt, die Rückfracht zu sichern [Eur07]. Daher wird in [ME10] die Reduzierung von Leerfahrten als großes Potential zur Optimierung einer Supply Chain ausgemacht.

Der KPI des Leerfahrtenanteils ist in Tabelle 7.4 dargestellt. Er bezeichnet das Verhältnis aus Transportentfernungen, die ohne Fracht zurückgelegt wurden, zur insgesamt zurückgelegten Entfernung innerhalb eines Betrachtungszeitraums. Der Leerfahrtenanteil sollte im Zusammenhang mit der durchschnittlichen Transportdistanz im Rahmen der Routenplanung betrachtet werden, da er in der Regel proportional zu dieser steigt [ME10].

Die im Zuge der Beschreibung der KPI für die Beladungseffizienz genannten Hinweise für mögliche Handlungsbedarfe sind ggf. schwierig umzusetzen, da vielfältige weitere Einflüsse auf die Beladung im Frachtgüterverkehr existieren, wie z.B. [McK+10]:

7. Entwicklung der KPI

| Auslastungsquote | |
|---|--------------------------------|
| $AQ = \frac{m}{NL_{\max}}$ | AQ KPI: Auslastungsquote |
| | m Masse der Zuladung (in kg) |
| | D Maximale Nutzlast (in kg) |
| Handlungsauftrag | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Bei hohem Wert prüfen ob eine strukturelle Änderung des Fuhrparks hin zu größeren Nutzlasten möglich ist. Ggf. kann auch eine Optimierung der Verpackung der Fracht sinnvoll sein. • Bei niedrigem Wert mögliches Optimierungspotential durch Verkleinerung des Fuhrparks bei konstanter Menge der insgesamt transportierten Fracht. | |
| Sonstiges | |
| <ul style="list-style-type: none"> • In Zusammenhang mit den anderen KPI der Beladungseffizienz betrachten. | |

Tab. 7.3.: Der KPI Auslastungsquote

| Leerfahrtenanteil | |
|--|--|
| $LF = \frac{D_{\text{Leer}}}{D_{\text{Last}}}$ | LF KPI: Leerfahrtenanteil |
| | D_{Leer} Leerfahrtdistanz (in km) |
| | D_{Last} Gesamtdistanz (in km) |
| Handlungsauftrag | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Potential bei der Planung der Rückfracht; • Prüfung der Möglichkeit des Fleet-Sharings mit anderen Logistikdienstleistern. | |
| Sonstiges | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Sollte im Zusammenhang mit der durchschnittlichen Transportdistanz im Rahmen der Routenplanung betrachtet werden, da der Leerfahrtenanteil in der Regel proportional zu dieser steigt. | |

Tab. 7.4.: Der KPI Leerfahrtenanteil

7. Entwicklung der KPI

- Größen- und Gewichtsbeschränkungen für die Fahrzeuge des Fuhrparks,
- die Notwendigkeit von Just-in-Time Lieferungen, die eine größere Flexibilität zu Lasten einer optimalen Auslastung erfordern oder
- Einschränkungen die durch die Handhabung der Produkte selbst bedingt sind.

Weitere Restriktionen sind in Abbildung A.9 auf Seite 86 im Anhang dargestellt.

Bei den in diesem Abschnitt dargestellten KPI wurde bzgl. der Beschränkung der Zuladung von LKW die Masse der Zuladung als Randbedingung gewählt. Gerade im Bereich der Lebensmittelindustrie kann es aber sinnvoll sein, das Volumen als einschränkende Randbedingung zu wählen, da die transportierten Güter in diesem Bereich in der Regel eine so geringe Dichte aufweisen, dass eine Beschränkung durch die maximale Nutzlast eines LKW nicht erreicht wird [ME10]. Daher kann es sinnvoll sein, die KPI statt auf die Nutzlast eines LKW auf das maximale Volumen zu beziehen.

7.2.3. Beispiel

Das folgende Beispiel soll verdeutlichen, wie wichtig eine Gesamtbetrachtung aller KPI der Beladungseffizienz ist und dass eine isolierte Betrachtung einzelner KPI zu Fehlinterpretationen führen kann. In Tabelle 7.5 werden fünf Fahrzeuge über ihre maximale Nutzlast NL_{\max} und ihren spezifischen Energieverbrauch bei voller Last (EV_{voll}) und bei einer Leerfahrt (EV_{leer}) definiert. Außerdem gehen aus Abbildung 7.2 drei verschiedene Streckenabschnitte zwischen den Knotenpunkten A, B und C hervor. Im Folgenden werden drei Szenarien betrachtet, in denen jeweils verschiedene Fahrzeuge mit verschiedenen Beladungszuständen Transportprozesse auf den verschiedenen Streckenabschnitten durchführen. Die Reihenfolge, in denen die Streckenabschnitte angefahren werden, ist immer gleich von A nach B, B nach C und C zurück zu A. Dabei werden zu jedem Szenario die KPI der Beladungseffizienz berechnet. Die Ermittlung der Ergebnisse erfolgte mit Hilfe der Software „Excel“ von Microsoft. Um den Rechenweg zu verdeutlichen, sind alle Berechnungen für das erst Beispielszenario ausführlich im Anhang dargestellt (siehe Anhang A.10 auf Seite 87). Die Berechnungen für die weiteren Beispielszenarien erfolgten analog zu Szenario 1.

| Fahrzeug-Nr. | Fahrzeugtyp | NL_{\max} (t) | EV_{leer} (l/100 km) | EV_{voll} (l/100 km) |
|--------------|---------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 | LKW (7,5 t; Euro 5) | 3,5 | 13 | 16,2 |
| 2 | LKW (5 t; Euro 5) | 2,4 | 10,1 | 12,3 |
| 3 | Van (3,5 t; Euro 3) | 1,2 | 9 | 11,6 |
| 4 | Van (3,5 t; Euro 3) | 1,2 | 9 | 11,6 |
| 5 | LKW (40 t; Euro 5) | 25 | 21,3 | 31,4 |

Tab. 7.5.: Beispiel - die Fahrzeugdaten (aus [Kra11, S. 148])

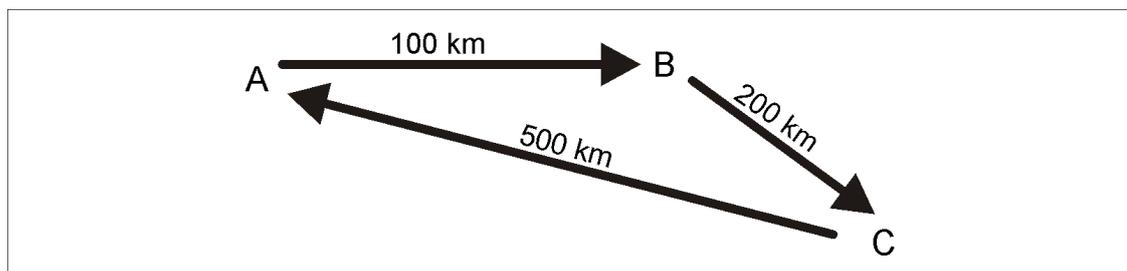


Abb. 7.2.: Beispiel - die Streckenabschnitte

Szenario 1

An diesem Szenario sind Fahrzeug Nr. 1 und 2 beteiligt. Die Zuladung auf den jeweiligen Streckenabschnitten geht aus Tabelle 7.6 hervor. Es wurden die folgenden Ergebnisse ermittelt (siehe Anhang A.10 auf Seite 87 im Anhang)

7. Entwicklung der KPI

- Gesamter Kraftstoffverbrauch $EV_{ges} = 194,69 \text{ l}$;
- Insgesamt wurden $515,93 \text{ kg } CO_2 - eq$ emittiert,
- Transporteffizienz $TE_{EM} = 0,48 \frac{\text{kg } CO_2 - eq}{\text{tkm}}$
- Fahrzeugeffizienz $FE = 180 \text{ tkm}$
- Auslastungsquote $AQ = 0,46$
- Leerfahrtenanteil $LF = 0,63$

| Fahrzeug-Nr. | Zuladung A→B | Zuladung B→C | Zuladung C→A |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 3 t | 1,5 t | 0 t |
| 2 | 2,4 t | 1,2 t | 0 t |

Tab. 7.6.: Beispiel - Zuladungstabelle zu Szenario 1

Szenario 2

An diesem Szenario sind Fahrzeug Nr. 1, 3 und 4 beteiligt. Die Zuladung auf den jeweiligen Streckenabschnitten geht aus Tabelle 7.7 hervor. Es wurden die folgenden Ergebnisse ermittelt:

- Gesamter Kraftstoffverbrauch $EV_{ges} = 198,89 \text{ l}$;
- Insgesamt wurden $527,06 \text{ kg } CO_2 - eq$ emittiert,
- Transporteffizienz $TE_{EM} = 0,49 \frac{\text{kg } CO_2 - eq}{\text{tkm}}$
- Fahrzeugeffizienz $FE = 120 \text{ tkm}$
- Auslastungsquote $AQ = 0,46$
- Leerfahrtenanteil $LF = 0,63$

| Fahrzeug-Nr. | Zuladung A→B | Zuladung B→C | Zuladung C→A |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 3 t | 1,5 t | 0 t |
| 3 | 1,2 t | 0,6 t | 0 t |
| 4 | 1,2 t | 0,6 t | 0 t |

Tab. 7.7.: Beispiel - Zuladungstabelle zu Szenario 2

Szenario 3

An diesem Szenario sind Fahrzeug Nr. 1, 3, 4 und 5 beteiligt. Die Zuladung auf den jeweiligen Streckenabschnitten geht aus Tabelle 7.8 hervor. Es wurden die folgenden Ergebnisse ermittelt:

- Gesamter Kraftstoffverbrauch $EV_{ges} = 439,94 \text{ l}$;

7. Entwicklung der KPI

- Insgesamt wurden 1165,84 kg CO₂ – eq emittiert,
- Transporteffizienz $TE_{EM} = 0,47 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{tkm}}$
- Fahrzeugeffizienz $FE = 206,67 \text{ t} \cdot \text{km}$
- Auslastungsquote $AQ = 0,21$
- Leerfahrtenanteil $LF = 0,63$

| Fahrzeug-Nr. | Zuladung A→B | Zuladung B→C | Zuladung C→A |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 3 t | 1,5 t | 0 t |
| 3 | 1,2 t | 0,6 t | 0 t |
| 4 | 1,2 t | 0,6 t | 0 t |
| 5 | 8 t | 3 t | 0 t |

Tab. 7.8.: Beispiel - Zuladungstabelle zu Szenario 3

Interpretation der Ergebnisse

In Szenario 1 und 2 wurde jeweils die gleiche Menge an Gütern transportiert. Allerdings wurde in Szenario 2 das zweite Fahrzeug (5 t, Euro 5) durch den Einsatz von zwei kleineren Vans ersetzt. Daraus ergibt sich ein leicht gestiegener Gesamtenergieverbrauch und eine Mehremission von CO₂-eq von rund 2 %. Der KPI der Transporteffizienz verhält sich proportional zu diesem Anstieg, was daran liegt, dass die Gesamtzahl der geleisteten Tonnenkilometer konstant geblieben ist. Der Wert der Transporteffizienz hingegen ist um 33 % deutlicher gesunken. Daraus ergibt sich der Handlungsauftrag zu überprüfen, ob eine Verkleinerung des Fuhrparks möglich ist, sodass auf jeden Transportprozess im Durchschnitt eine größere Anzahl geleisteter Tonnenkilometer zurückfällt.

In Szenario 3 wird die Gesamtmenge der transportierten Güter durch den Einsatz eines zusätzlichen Fahrzeugs (40 t, Euro 5) drastisch erhöht. Dabei wird der größere LKW aber nur zu einem geringen Teil ausgelastet. Auffällig an den Ergebnissen ist, dass sich der Wert der Transporteffizienz leicht und der Wert für die Fahrzeugeffizienz stark verbessert, was auf die Veränderung der insgesamt transportierten Gütermenge zurückzuführen ist. An dieser Stelle wird die Notwendigkeit deutlich, die KPI der Transporteffizienz als System von KPI zu betrachten. Das große Verbesserungspotential dieses Szenarios spiegelt sich nämlich in einem starken Rückgang der Auslastungsquote wieder, die insgesamt im Vergleich zu Szenario 2 um rund 50 % zurückgegangen ist. Der Handlungsauftrag, der sich aus diesem Szenario ergibt, ist also eine Prüfung der Erhöhung der Gesamtauslastung, entweder durch den Einsatz von kleineren Fahrzeugen statt dem größeren LKW, oder durch eine weitere Erhöhung der Menge der insgesamt transportierten Güter.

7.2.4. KPI der Energieeffizienz

Die Umweltauswirkungen des Frachtguttransportes auf der Straße hängen in erster Linie mit dem Energieverbrauch der Fahrzeuge zusammen [McK10b]. Dies ist auch an der Grundformel zur Emissionsberechnung zu erkennen, in der der Energieverbrauch über einen Umrechnungsfaktor in CO₂-eq umgerechnet wird 5.1. Um die Transporteffizienz zu optimieren, sollte der Energieverbrauch pro Bezugseinheit (in diesem Fall Tonnenkilometer) minimiert werden.

Das Fahrverhalten des Fahrers hat diesbezüglich eine besondere Relevanz. Aus der Formel für die Energieverbrauchsrate (siehe Formel 5.10) sind die wichtigsten Parameter, die das Fahrverhalten charakterisieren, ersichtlich:

- Die Geschwindigkeit wirkt sich auf den vom Antrieb zu überwindenden Luftwiderstand aus und geht sogar quadratisch in Formel 5.8 ein. Außerdem ist die benötigte Gesamtleistung linear von der Geschwindigkeit abhängig (siehe Formel 5.11);
- Bei jedem Beschleunigungsvorgang muss der Beschleunigungswiderstand überwunden werden. Das Fahrverhalten wirkt sich in diesem Zusammenhang auf die Intensität und die Anzahl der Beschleunigungsvorgänge während eines Transportprozesses aus;
- Die momentane Drehzahl wirkt sich auf den Wirkungsgrad des Motors aus. Von letzterem ist erneut die Verbrauchsrate abhängig (siehe Formel 5.10).

Aufgrund dieser Einflüsse ist das Fahrverhalten der entscheidene Faktor für die Höhe der von einem Motor zu erbringenden Leistung und damit auch für den Energieverbrauch [McK10b]. Allerdings gibt es neben dem Faktor Mensch noch viele weitere Einflüsse, die die Charakteristika von Beschleunigungsvorgängen und der Geschwindigkeit während eines Streckenabschnittes bestimmen. Dazu zählen nach [Eri00a] unter Anderem

- Wettereinflüsse wie die Witterung oder Sichtverhältnisse,
- die Verkehrssituation oder
- straßenspezifische Eigenschaften wie die Beeinflussung des Verkehrs durch Ampelsysteme.

Um Streckenabschnitte hinsichtlich der Charakteristika von Beschleunigungsvorgängen zu bewerten, wird in der Regel Equipment im Fahrzeug installiert, das die momentane Geschwindigkeit und Beschleunigung (wenn die Beschleunigung nicht im Nachhinein durch Differentiation ermittelt wird), sowie weitere Werte wie die momentane Drehzahl des Motors über einen definierten Zeit- und Streckenabschnitt aufzeichnet. Entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis einer solchen Analyse hat dabei die Auflösung mit der die Zeit gemessen wird und die kürzeste Distanz, die bestimmt werden kann. [Eri00b]

7. Entwicklung der KPI

| durchschnittliche positive Beschleunigung (RPA) | |
|--|---|
| $\mathbf{RPA} = \frac{\int_0^T (\mathbf{v} \cdot \mathbf{a}^+)}{D}$ | RPA durchschnittliche positive Beschleunigung (in m/s^2) |
| | T Fahrtzeit (in s) |
| | v Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t (in m/s) |
| | a^+ Beschleunigung zum Zeitpunkt t (in m/s) für a^+ gilt $da^+/dt > 0$ |
| | D Distanz (in m) |
| Handlungsauftrag | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Optimierungspotential bei der Routenplanung hinsichtlich des Verkehrs (Vermeidung von Ballungsgebieten und vielbefahrenen Straßen) • Fahrschulungen zur Vermeidung von Beschleunigungsvorgängen und vorausschauendem Fahren | |
| Sonstiges | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Die Voraussetzung zur Ermittlung der RPA ist die Ausstattung des jeweiligen Fahrzeugs mit dem benötigten Messequipment. | |

Tab. 7.9.: Der KPI durchschnittliche positive Beschleunigung (RPA)

Der KPI zur Bewertung des Fahrverhaltens ist in Tabelle 7.9 dargestellt [Eri00a]. Dabei handelt es sich um die geschwindigkeitsbezogene, durchschnittliche positive Beschleunigung bezogen auf einen Streckenabschnitt. Diese Kennzahl wird im Folgenden als RPA bezeichnet (übersetzt aus dem Englischen „relative positive acceleration“). [Eri00a]

Der RPA gilt als gute Möglichkeit den Leistungsbedarf während der Fahrt über einen Streckenteilabschnitt zu messen [Eri00a] und ist damit auch für die Bewertung eines Transportprozesses hinsichtlich seiner Transporteffizienz geeignet.

Eine weitere Möglichkeit die Energieeffizienz von Transportprozessen zu verbessern, ist die Auswahl des verwendeten Kraftstoffes anhand der ausgestoßenen THG-Emissionen bezogen auf eine Verbrauchseinheit. Außerdem kann eine verbesserte Aerodynamik, ein reduziertes Eigengewicht und effizientere Filter- und Motorentechnik, die ggf. auf grünere Kraftstoffe oder Hybrid-Technik setzt, zur erheblichen Reduzierung des Energieverbrauchs führen [McK10b]. Die eben genannten Faktoren sind allgemein mit strukturellen Änderungen des Fuhrparks und konkret ausgedrückt, mit der Neuanschaffung von energieeffizienteren Fahrzeugen verbunden. Außerdem kann durch die Wahl der Bereifung der Rollwiderstand beeinflusst werden. An dieser Stelle werden keine eigenständigen KPI für diese einzelnen Faktoren gebildet, da bei einer Entscheidung über Neuanschaffungen auch keine Einzelbetrachtung dieser vorgenommen wird. Eine Entscheidung bzgl. der Umstrukturierung des Fuhrparks könnte stattdessen auf Basis der Transporteffizienz ge-

7. Entwicklung der KPI

troffen werden, wobei das Gewicht der Zuladung durch das Eigengewicht der Fahrzeuge ersetzt wird um die Auslastung nicht in die Entscheidung mit einfließen zu lassen.

7.2.5. KPI der Routeneffizienz

Nicht nur das Vermeiden von Transportprozessen durch eine Optimierung der Beladungseffizienz, auch eine Minimierung des Parameters der Transportdistanz wirkt sich unmittelbar auf die Transporteffizienz aus.

In [KI12] konnte gezeigt werden, dass die Gesamtmenge an emittierten CO₂-eq geringer wird, umso mehr Warenlager innerhalb des Distributionsnetzes vorhanden sind. Auch wenn die Distanzen einzelner Transportprozesse bei Veränderung des Distributionsnetzes steigen können, so wird dies durch eine bessere Lage aller Warenlager zum Kunden ausgeglichen. In diesem Zusammenhang ist auch die Kundendichte von großer Bedeutung. Gerade wenn Bereiche hoher Kundendichte auch mit einer hohen Dichte von Warenlagern ausgestattet sind, kann die durchschnittliche Transportdistanz innerhalb des Distributionsnetzes und damit auch die Emission von THG verringert werden. [KI12]

Die durchschnittliche Transportdistanz kann daher von Unternehmen als KPI zur Entscheidungsfindung eingesetzt werden, welcher externe Transportdienstleister für die Distribution der Waren eingesetzt werden soll. Das Netzwerk von Distributionslagern des Dienstleisters sollte dabei auf die Kundendichte des Unternehmens abgestimmt sein. Auf diese Weise kann die Menge von Scope-3-Emissionen verringert werden. Allerdings ist zu beachten, das im Falle eines unternehmensinternen Distributionsnetzes eine Strukturveränderung z.B. durch den Neubau von Distributionslagern mit erheblichen Scope-1-Emissionen verbunden ist. Der KPI der durchschnittlichen Transportdistanz ist in Tabelle 7.10 dargestellt.

7.3. KPI des Lagerprozesses

Analog zu Abschnitt 7.2 auf Seite 55 ist das Zielsystem bzgl. der Steigerung der Lager-Effektivität in Abbildung 7.3 auf Seite 68 dargestellt. Zur Steigerung der Lagereffektivität, wird eine Steigerung der Lagereffizienz angestrebt.

7.3.1. Der KPI Lagereffizienz

Die Funktion der Lagerung ist eine Überbrückung von Zeit. Daher ist auch die Zeit eine wichtige Bezugseinheit für die Effizienz eines Lagerprozesses. Außerdem wird statt der Masse das Volumen als weiterer Teil der Bezugseinheit gewählt, da dieses in der Regel die einschränkende Bedingung für die Menge von gelagerten Gütern in Gebäuden darstellt.

7. Entwicklung der KPI

| durchschnittliche Transportdistanz | |
|---|---|
| $DT = \frac{D}{TP}$ | DT durchschnittliche Transportdistanz (in km) |
| | D Transportdistanz (in km) |
| | TP Anzahl der Transportprozesse |
| Handlungsauftrag | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Bei der Wahl eines externen Distributionsdienstleisters prüfen, ob die örtliche Dichte des Distributionsnetzes mit der eigenen örtlichen Kundendichte auf kurze Transportdistanzen schließen lässt. | |
| Sonstiges | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Nur für Entscheidungen bezüglich externer Transportdienstleister oder in der Planungsphase eines eigenen Distributionsnetzes sinnvoll. | |

Tab. 7.10.: Der KPI durchschnittliche Transportdistanz

Der KPI der Lagereffizienz ist in

In den folgenden Abschnitten werden KPI aus dem Bereich der Kühlung vorgestellt, mit denen die Lagereffizienz gesteigert werden kann.

7.3.2. KPI der THG-Effizienz

Die Hauptenergiequelle für die Funktion der Kühlung ist elektrischer Strom [Mar10]. Deshalb besteht hinsichtlich der Klimafreundlichkeit von Stromprodukten ein großes Optimierungspotential für die Klimafreundlichkeit eines Lagers im Bereich des Lebensmittelsektors. Die Emissionen aus zugekauftem elektrischem Strom sind dem Bereich Scope 2 zuzuordnen (siehe Abschnitt 2.3.1 auf Seite 12)

Um die Menge an THG-Emissionen, die sich aus dem Stromverbrauch eines Unternehmens ergeben zu reduzieren, können Unternehmen auf Ökostromprodukte zurückgreifen. Damit ist gemäß Abschnitt 5.2.3 auf Seite 33 aus regenerativen Energiequellen erzeugter Strom gemeint, wobei einige Anbieter von Ökostrom mit einer vollständigen Klimaneutralität ihrer Produkte werben. Das Verhältnis des bezogenen Ökostrom zum Gesamtstromverbrauch kann jedoch nicht ohne weiteres als KPI verwendet werden. Durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ist eine gesetzlich vorgeschriebene Quote zur Einspeisung von Ökostrom in das öffentliche Netz gegeben. Daraus folgt, dass ein Großteil des erzeugten Ökostroms mit in die gesamtdeutsche Bilanzierung und damit in den Umrechnungsfaktor des deutschen Strommix eingeht. Bezieht ein Unternehmen Ökostrom von einem Energieversorger, so wird dadurch der Ökostrom-Gesamtanteil im deutschen Strommix nicht erhöht, solange es nicht zum Neubau von Anlagen zur regenerativen

7. Entwicklung der KPI

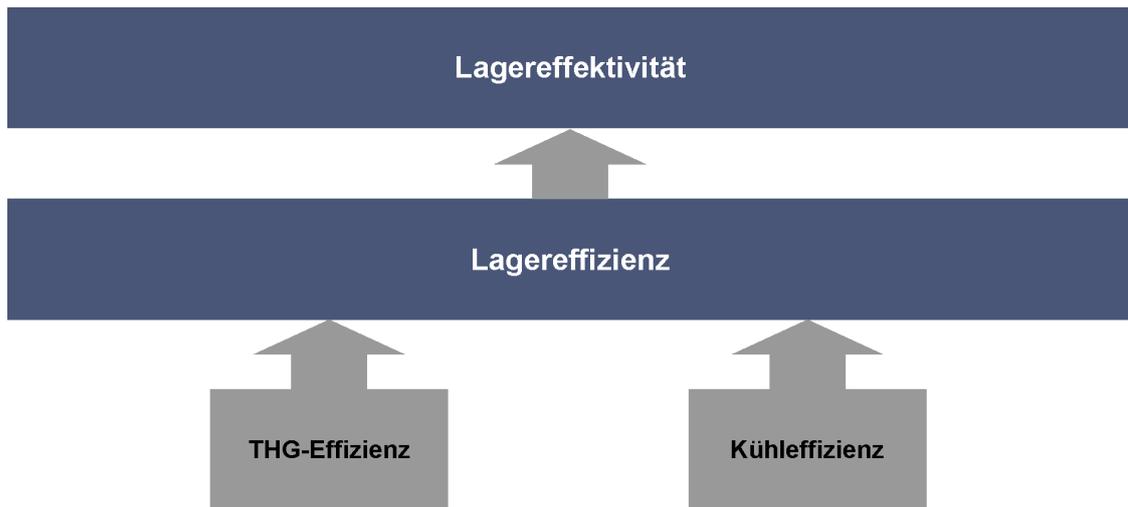


Abb. 7.3.: Kategorisierung der KPI für den Lagerprozess

| Lagereffizienz | |
|--|--|
| $LE_{EM} = \frac{F_{CO_2} \cdot EV}{T \cdot V}$ | LE_{EM} Lagereffizienz (in kgCO ₂ -eq/h·m ³) |
| | F_{CO_2} CO ₂ -Umrechnungsfaktor (in kgCO ₂ -eq/kWh) |
| | EV Energieverbrauch (in kWh) |
| | T Lagerzeit (in h) |
| | V Eingelagertes Volumen (in m ³) |
| Handlungsauftrag | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Potentiale durch Optimierung der Auslastung des Lagers und Steigerung der THG- bzw. Kühleffizienz. | |
| Sonstiges | |
| | |

Tab. 7.11.: Der KPI Lagereffizienz

Stromproduktion kommt. Dies wird auch als nicht vorhandener “zusätzlicher Umweltnutzen” bezeichnet [BMU09, S. 11]. Der Neubau von Anlagen ist aber für Energieversorger aus Kostengründen in der Regel wenig attraktiv, da ältere Anlagen zur Stromerzeugung in der Regel bereits zu einem Großteil steuerlich abgeschrieben sind. Deshalb ist bei der Bildung eines Ökostrom-KPI das Anlagenalter mit einzubeziehen. Bei der Ausweisung von Ökostrom wird diesbezüglich häufig der Anteil der Stromerzeugung, der aus dem EEG hervorgeht, angegeben (z.B. durch diverse Zertifikate des TÜV (EE01, UE01) oder dem “ok-Power-Label”). Der KPI des Ökostromanteils berücksichtigt den Vorschlag des IFEU zur Einbeziehung des Anlagenalters und ist in Tabelle 7.12 dargestellt.

7. Entwicklung der KPI

| Ökostromanteil | |
|---|--|
| $\text{ÖSA} = \frac{\text{ÖS}_{\text{neu}} + \frac{1}{2} \cdot \text{ÖS}_{\text{best}}}{\text{SV}_{\text{ges}}}$ | SA Ökostromanteil |
| | S_{neu} Ökostrom aus Neuanlagen (in kWh) |
| | S_{best} Ökostrom aus neueren Bestandsanlagen max. 6 Jahre alt (in kWh) |
| | SV_{ges} Gesamtstromverbrauch (in kWh) |
| Handlungsauftrag | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Wahl eines Ökostromproduktes mit hohem Neuanlagenanteil bzw. geringem EEG-Anteil. | |
| Sonstiges | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Bei Ökostromprodukten aus dem Ausland oder mit einem hohen Anteil an im Ausland erzeugtem Strom, ist der Transportverlust kritisch zu hinterfragen. | |

Tab. 7.12.: Der KPI Ökostromanteil

7.3.3. KPI der Kühleffizienz

Die Wärmeenergie, die einem Produkt entzogen werden muss, um es auf eine Zieltemperatur herunterzukühlen, ist abhängig von den Transmissionswärmeverlusten durch die Begrenzungsflächen des Kühlraums (siehe Formel 5.19). Eine wichtige Kennzahl zur Auslegung von Kühlräumen in der Planungsphase eines Lagers ist daher das Außenflächen-Volumen-Verhältnis (AVV). Der Transmissionswärmestrom verhält sich proportional zum Flächeninhalt der Begrenzungsflächen. Da das Volumen als kubisches Maß bei größer werdenden Abmaßen eines Kühlraums schneller wächst als die Fläche als quadratisches Maß, wird das AVV mit wachsendem Raumvolumen geringer, was einer Reduzierung des Transmissionswärmeverlustes gleichkommt. Daher ist bei der Auslegung von Kühlräumen eine möglichst großes Volumen anzustreben. Der KPI des AVV ist in Tabelle 7.13 dargestellt.

Weiterhin hängt der Kältebedarf maßgeblich von der Belüftung der Kühlräume und allgemein vom Luftaustausch zwischen einem Kühlraum und seiner Umgebung ab und diesbezüglich besonders von der Art und Anzahl von Türflächen, sowie von der Zeit, in der diese Türen geöffnet sind [Mar10]. Daher wird als KPI der Türöffnungszeitanteil aus Formel 5.27 identifiziert. Er ist in Tabelle 7.14 dargestellt.

Um die Effizienz einer Kälteanlage zu beurteilen, kann ihre Leistungszahl herangezogen werden. Diese ist definiert als das Verhältnis aus erbrachter Kühlleistung zur eingesetzten elektrischen Leistung [Poh08]. Diese Leistungszahl wird auch Kälteleistungsgrad genannt und ist abhängig von der Art der Kälteanlage und der verwendeten Kältemittel. Außerdem können einzelne Komponenten einer Anlage einen großen Einfluss auf den Käl-

7. Entwicklung der KPI

| Außenflächen-Volumen-Verhältnis | |
|--|---|
| $AVV = \frac{A_{ges}}{V_{Raum}}$ | AVV Außenflächen-Volumen-Verhältnis |
| | A_{ges} Flächeninhalt der Außenflächen (in m ²) |
| | V_{Raum} Volumen des Kühlraums (in m ³) |
| Handlungsauftrag | |
| <ul style="list-style-type: none"> Bei der Auslegung von Kühlräumen sollte ein möglichst geringes AVV angestrebt werden. Mit wachsendem Volumen sinkt der AVV, deshalb ist eine größtmögliche Volumenausnutzung zur Reduzierung des Kältebedarfs vorteilhaft. | |
| Sonstiges | |

Tab. 7.13.: Der KPI Außenflächen-Volumen-Verhältnis

| Türöffnungs-Zeitanteil | |
|---|--|
| $TZA = \frac{P \cdot \Theta_p + 60 \cdot \Theta_o}{3600 \cdot \Theta_d}$ | TZA Türöffnungs-Zeitanteil |
| | P Anzahl der Türöffnungen |
| | Θ_p Zeitraum der Türöffnung und Schließung (in s) |
| | Θ_o Zeitraum in dem Türöffnung offen steht (in min) |
| | Θ_d Gesamtzeit des Betrachtungszeitraums (in h) |
| Handlungsauftrag | |
| <ul style="list-style-type: none"> Sicherstellen, dass Türen nur bei Bedarf geöffnet sind z.B. durch automatische Türschließungssysteme oder schnell auf- und zufahrende Türsysteme. Prüfen, ob die Anzahl der Türöffnungen verringert werden kann. | |
| Sonstiges | |

Tab. 7.14.: Der KPI Türöffnungszeitanteil

7. Entwicklung der KPI

| Kälteleistungsgrad | |
|---|--|
| $\text{KLG} = \frac{\dot{Q}_0}{P_{\text{elektrisch}}}$ | KLK Kälteleistungsgrad |
| | \dot{Q}_0 Kälteleistung (in W) |
| | a_p elektrische Leistungsaufnahme (in W) |
| Handlungsauftrag | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Optimierung der Auslegung der Verdampfungs und Kondensationstemperatur. Je geringer die Differenz, desto geringer ist die vom Verdichter zu überwindende Druckdifferenz; • Prüfen ob ein überdimensionierter Antrieb vorliegt. | |
| Sonstiges | |
| | |

Tab. 7.15.: Der KPI Kälteleistungsgrad

teleistungsgrad der gesamten Anlage haben und sollten somit auch für sich genommen Ausgangspunkt für Optimierungen sein. Besonders bei den weit verbreiteten Kompressionskälteanlagen kommt dem Verdichter mit einem Anteil von rund 90 % eine große Bedeutung bzgl. der elektrischen Leistungsaufnahme zu [EAN13].

Der KPI des Kälteleistungsgrades ist in Tabelle 7.15 dargestellt.

8. Diskussion

In diesem Kapitel werden die zur Bearbeitung der Aufgabenstellung angewandte Vorgehensweise und die erzielten Ergebnisse kritisch bewertet.

Die Ableitung von Kriterien zur Identifizierung wichtiger THG-Parameter und zur Entwicklung von KPI aus dem Stand der Technik zu Kennzahlen und dem KPI-Begriff selbst hat sich als zielführend erwiesen. Es ist gelungen die Grundcharakteristika der sogenannten „Leistungsindikatoren“ herauszuarbeiten, wie KPI in vielen der recherchierten Quellen genannt werden. Allerdings ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die herausgearbeitete Definition nicht ohne Weiteres auf die Interpretation in den einzelnen recherchierten Quellen zurückzuführen ist und immer im Kontext dieser Arbeit betrachtet werden sollte.

Die Eingrenzung des Systems der Distributionslogistik, welches in dieser Arbeit betrachtet wird, auf den Bereich des Frachtguttransportes über die Straße und die Funktion der Kühlung im Lager, war bzgl. der Relevanz dieser Bereiche hinsichtlich der Emission von THG im Lebensmittelsektor grundsätzlich sinnvoll. Schließlich ist es laut den abgeleiteten KPI-Kriterien das Ziel dieser Arbeit, für zukunftsbezogene Entscheidungen möglichst KPI zu bilden, die einen starken Einfluss auf die THG-Emissionen des Gesamtsystems haben. Einzelfälle von Distributionssystemen innerhalb des Lebensmittelsektors, in denen z.B. die in Lagern befindlichen Förder- oder Kommissionieranlagen für einen größeren Teil der THG-Emissionen verantwortlich sind, werden aber durch diese Vorgehensweise nicht berücksichtigt. Auch der Frachtguttransport über weitere Verkehrsmittel kann für die Umsetzung von Emissionsminderungszielen große Bedeutung haben. Da in dieser Arbeit aber ein hoher Detaillierungsgrad auf physikalischer Ebene bei der Aufschlüsselung der THG-Parameter angestrebt wurde und z.B. im Falle der Kommissionierung eine Vielzahl unterschiedlicher Anlagen und Techniken hätten betrachtet werden müssen, war eine Eingrenzung auf die speziellen Fälle des LKW-Verkehrs und der Kühlung angemessen.

Das Herstellen einer Informationsgrundlage sowohl aus physikalischen Grundlagen wie der Fahrzeugphysik oder der Ermittlung des Kältebedarfs, als auch aus anerkannten Normen und Richtlinien wie der Norm DIN EN 16258, führte zu einer strukturierten Aufschlüsselung wichtiger THG-Parameter innerhalb der Systemgrenzen dieser Arbeit. Diese Parameter können in Simulationsmodellen verwendet werden, um mit den dargestellten Formeln die Emission von THG durch die Durchführung von Simulationen zu bestimmen. Ein solches Modell würde auf den physikalischen Grundlagen zur Fahrzeugphysik

8. Diskussion

und des Kältebedarfes beruhen und wahrscheinlich mit einem großen Rechenaufwand als auch einem großen Aufwand zur Erhebung der benötigten Daten einhergehen.

Während der Entwicklung der KPI wurde auf eine übersichtliche Darstellung Wert gelegt, die einen klaren Handlungsauftrag enthält und auf Abhängigkeiten zwischen den einzelnen KPI hinweist. Letzteres ist gerade für die KPI der Beladungseffizienz von großer Bedeutung, was aus dem gezeigten Beispiel hervorgeht. Leider konnte in diesem Bereich kein einzelner KPI identifiziert werden, mit dem eine Leistungsmessung hinsichtlich der Effizienz von Transportprozessen möglich ist. Das liegt an den Abhängigkeiten der enthaltenen Parameter wie Distanz, Anzahl der Transportprozesse oder Nutzlast untereinander. Im Rahmen der Betrachtung als KPI-System können aber zukunftsbezogene Entscheidungen getroffen werden. Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass es durch die Fokussierung der Effizienz der Prozesse und nicht der Effektivität (wie es z.B. im Falle des PCF der Fall ist) gelungen ist, den einzelnen KPI konkrete Handlungsaufforderungen zuzuordnen.

9. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel wird zunächst eine kurze Zusammenfassung dieser Arbeit gegeben und dann in einem Ausblick mögliche Anknüpfungspunkte für weitere Untersuchungen aufgezeigt.

9.1. Zusammenfassung

Um zukunftsbezogene Entscheidungen hinsichtlich der Senkung von THG-Emissionen innerhalb der Distributionslogistik im Lebensmittelsektor treffen zu können, bedarf es KPI, anhand denen die Effizienz der beteiligten Logistikprozesse beurteilt und durch einen klaren Handlungsauftrag verbessert werden kann.

Zunächst wurde durch die Darstellung der Grundlagen zur Erfassung von THG auf verschiedenen Ebenen, der konzeptionelle Bezugsrahmen für diese Arbeit aufgezeigt. Dabei wurden die wichtigsten Grundlagen des menschlichen Einflusses auf das Klimasystem der Erde dargestellt und etablierte Standards und Normen zur Erfassung von THG beschrieben, unter anderem die Methoden des LCA und PCF.

Anschließend wurden ausgehend von Standardliteratur zum Thema Kennzahlen und KPI die grundlegenden Charakteristika des KPI-Begriffes herausgearbeitet und aus diesen ein Kriterienkatalog zur Identifizierung der relevanten THG-Parameter und Entwicklung von KPI abgeleitet. Dabei wurden die drei Hauptkriterien des Leistungsbezugs, der Relevanz und des Handlungsauftrags bzgl. des Ziels, die Emission von THG zu senken, identifiziert.

Daraufhin wurde die Distributionslogistik für diese Arbeit eingegrenzt. Ausgehend von dem Fokus auf dem Lebensmittelsektor wurde die besondere Relevanz der Kühlung innerhalb des Lagerprozesses dargelegt. Außerdem wurde der Frachtguttransport über die Straße als bedeutendster Modus des Transports identifiziert, woraus sich die Eingrenzung der betrachteten Logistikprozesse auf den Frachtguttransport über die Straße und die Lagerung, insbesondere die Kühlung ergab.

Im Anschluss wurde eine Informationsgrundlage hinsichtlich der Aufschlüsselung der wichtigsten THG-Parameter geschaffen. Dazu wurden die physikalischen Grundlagen zur Fahrzeugphysik und der Ermittlung des Kältebedarfs, das Prinzip der Berechnung von THG-Emissionen über einen Umrechnungsfaktor und wichtige Formeln und Standards,

9. Zusammenfassung und Ausblick

insbesondere aus der Norm DIN EN 16258 dargestellt.

Vor der eigentlichen Aufschlüsselung und Zusammenfassung der THG-Parameter erfolgte eine kurze Klärung des Parameterbegriffes, als Einstellgröße zur Anpassung eines Modells an ein ihm zu Grunde liegendes, reales System. Dann wurde ausgehend von den Ausführungen zur Fahrzeugphysik ein Kräftegleichgewicht am ruhenden LKW aufgestellt und so die Zusammenhänge der wichtigsten THG-Parameter des Transportprozesses aufgezeigt. Die THG-Parameter der Kühlung während des Lagerprozesses wurden direkt aus den Ausführungen zur Ermittlung des Kältebedarfes übernommen.

Bei der anschließenden Entwicklung der KPI wurde der Fokus auf die Effizienz der beteiligten Logistikprozesse gelegt. Im Falle des Transportprozesses wurden KPI zu den Kategorien der

- Transporteffizienz,
- Beladungseffizienz,
- Energieeffizienz und
- Routeneffizienz

gebildet. Analog dazu sind die dargestellten Kategorien bzgl. des Lagerprozesses die

- Lagereffizienz,
- THG-Effizienz und
- Kühleffizienz.

9.2. Ausblick

Über die Eingrenzung der Distributionslogistik für diese Arbeit auf den Bereich des Frachtguttransportes über die Straße und die Lagerung, insbesondere der Kühlung, hinaus, ist eine Ausweitung des betrachteten Systems sinnvoll. So könnten weitere KPI zu verschiedenen Transportmodi wie dem Frachtguttransport per Bahn oder Schiff Optimierungspotentiale hinsichtlich der gewählten Modi innerhalb eines Distributionsnetzes aufzeigen. Die gilt analog für die Logistikprozesse des Umschlags und der Kommissionierung.

Die THG-Parameter die in dieser Arbeit auf Grundlage der Fahrzeugphysik und des Kältebedarfes identifiziert wurden, können zur Ermittlung von THG-Emissionen in ein Simulationsmodell eingehen. Dies stellt einen möglichen Anknüpfungspunkt an das eSAVE-Projekt dar. Die im Zuge des Projektes entwickelte Daten-Infrastruktur könnte die in dieser Arbeit verwendeten Modelle der Fahrzeugphysik und des Kältebedarfes mit einbeziehen, um eine detaillierte Simulation der Emission von THG zu ermöglichen. Da-

9. Zusammenfassung und Ausblick

bei sind allerdings die Randbedingungen des Aufwandes der Datenerhebung durch ein Monitoring-System und der womöglich hohe Rechenaufwand bei der Durchführung von Simulationen zu beachten.

Die entwickelten KPI können neben den etablierten Methoden der Ökobilanzierung wie dem LCA oder PCF zur Optimierung der Effizienz von Logistikprozessen dienen. Dies kann anders als bei diesen Methoden auch unabhängig von einer vollständigen Sachbilanzierung aller Einflussfaktoren auf die Emission von THG geschehen. Deshalb sind die in dieser Arbeit entwickelten KPI und weitere mögliche KPI über die Systemgrenzen dieser Arbeit hinaus als Ergänzung zu den Methoden der Ökobilanzierung zu sehen.

A. Anhang

A.1. LCA-Produktsystem

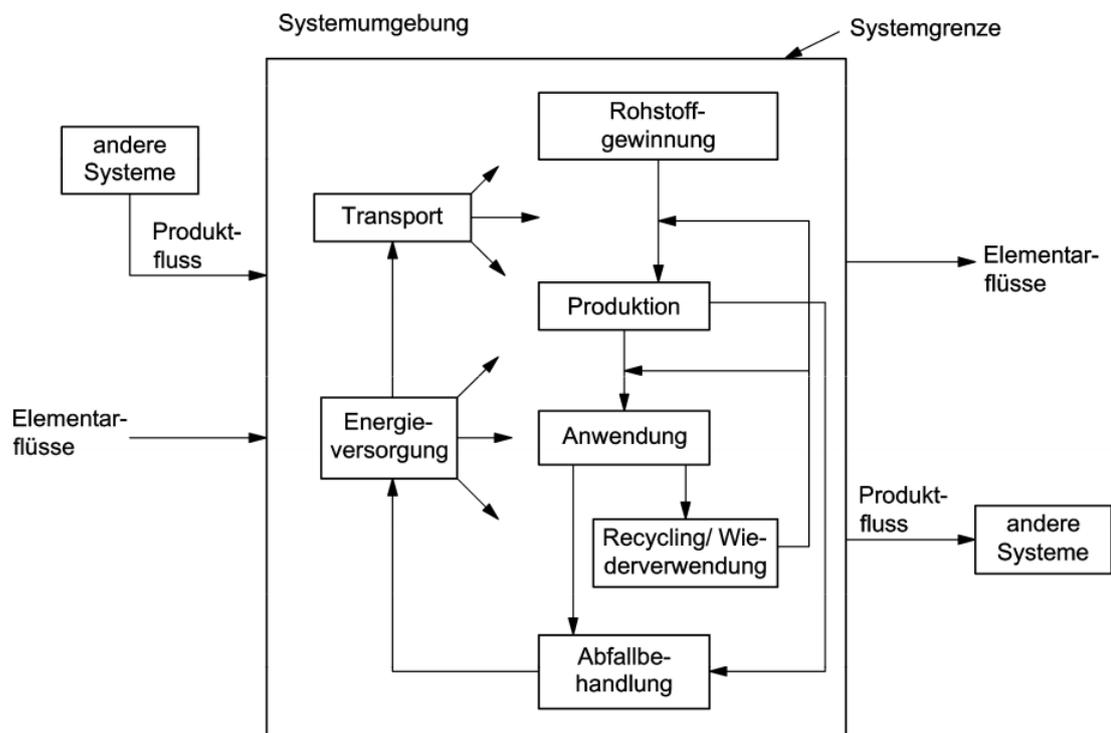


Abb. A.1.: Beispiel eines Produktsystems einer LCA-Studie [DIN09, S. 21]

A.2. LCA-Wirkungsabschätzung

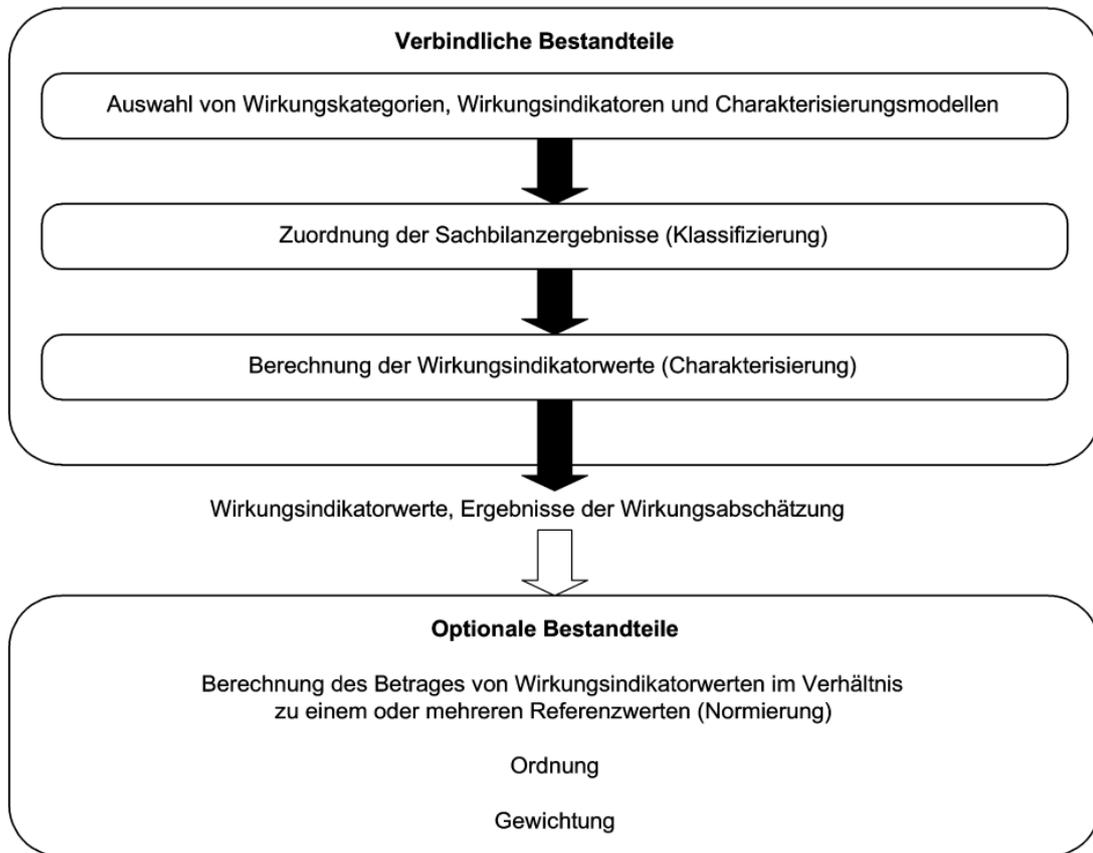


Abb. A.2.: Bestandteile der Wirkungsabschätzung einer LCA-Studie [DIN09, S. 29]

A.3. PCF-Prozessnetz

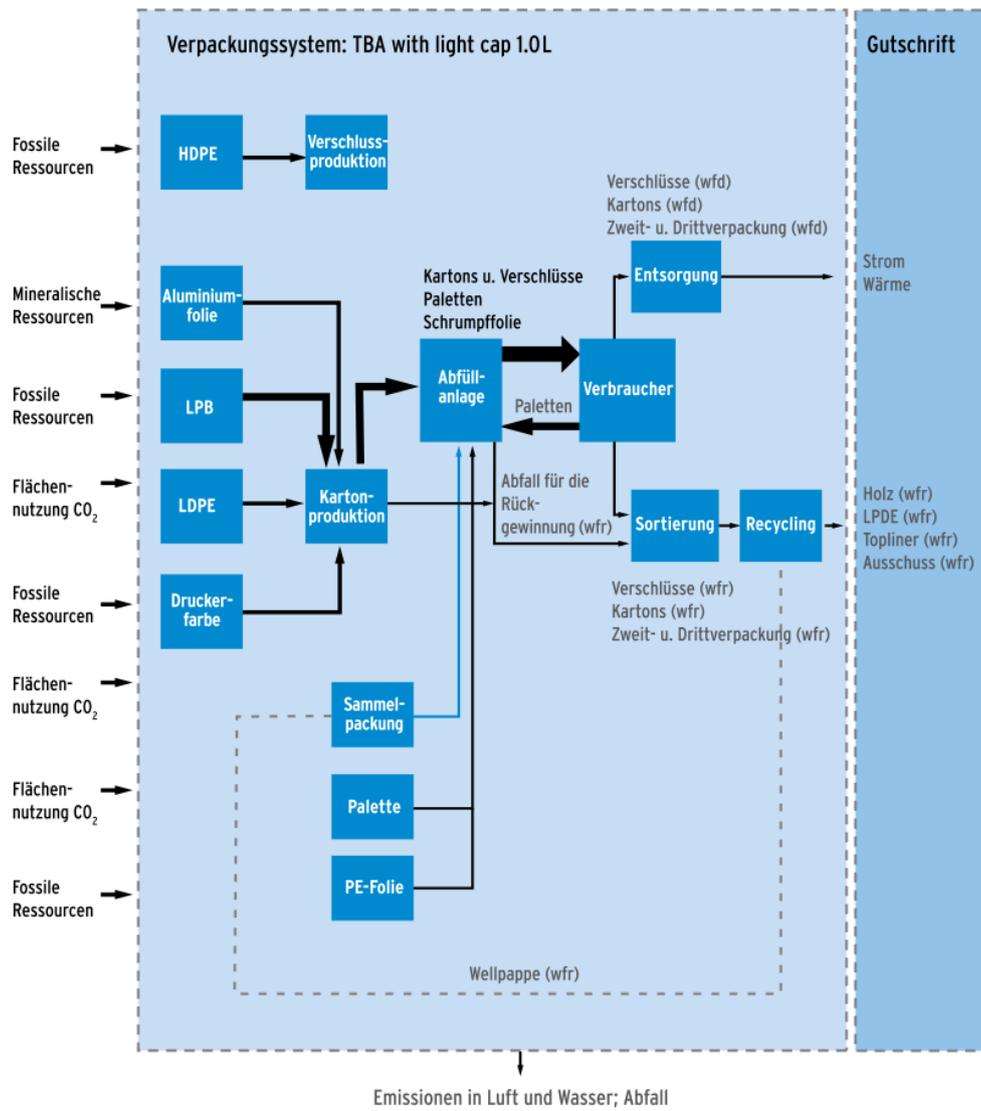


Abb. A.3.: Beispielhafte Darstellung eines Prozessnetzes einer PCF-Erhebung [BMU12, S. 31]

A.4. Emissionsfaktoren BMU

| | Kohlendioxidemissionen der Stromerzeugung | Stromverbrauch | CO ₂ -Emissionsfaktor Strommix | Stromverbrauch incl. Stromhandelsaldo | CO ₂ -Emissionsfaktor Strominlandsverbrauch |
|--------------|---|----------------|---|---------------------------------------|--|
| Jahr/Einheit | Mio. t | TWh | g/kWh | TWh | g/kWh |
| 1990 | 357 | 480 | 744 | 481 | 743 |
| 1991 | 353 | 474 | 744 | 474 | 745 |
| 1992 | 336 | 474 | 710 | 468 | 718 |
| 1993 | 328 | 463 | 708 | 464 | 707 |
| 1994 | 327 | 464 | 704 | 467 | 701 |
| 1995 | 327 | 470 | 696 | 474 | 689 |
| 1996 | 328 | 487 | 674 | 482 | 682 |
| 1997 | 317 | 488 | 650 | 485 | 653 |
| 1998 | 321 | 492 | 652 | 491 | 653 |
| 1999 | 310 | 492 | 630 | 493 | 629 |
| 2000 | 319 | 509 | 627 | 512 | 623 |
| 2001 | 327 | 509 | 642 | 508 | 644 |
| 2002 | 329 | 518 | 635 | 519 | 634 |
| 2003 | 332 | 533 | 622 | 525 | 631 |
| 2004 | 324 | 539 | 602 | 532 | 610 |
| 2005 | 324 | 543 | 597 | 534 | 607 |
| 2006 | 330 | 559 | 590 | 540 | 611 |
| 2007 | 339 | 560 | 605 | 541 | 626 |
| 2008 | 319 | 561 | 568 | 538 | 592 |
| 2009 | 292 | 524 | 557 | 510 | 573 |
| 2010 | 305 | 560 | 546 | 542 | 563 |
| 2011* | 305 | 541 | 564 | 535 | 570 |
| 2012** | 317 | 550 | 576 | 527 | 601 |

Abb. A.4.: Kohlendioxidemissionen der Stromerzeugung, Stromverbrauch und CO₂-Emissionsfaktor des Stroms [Ich13, S. 2]

A.5. Emissionsfaktoren mit Energievorkette

| Land | Energieverluste durch Verteilung ¹⁾ | Energieverbrauch | | CO ₂ -Emissionen | | THG-Emissionen (CO ₂ e) | |
|----------------------|--|----------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------------------|----------------------|
| | | direkt ²⁾ | gesamt ³⁾ | direkt ⁴⁾ | gesamt ⁵⁾ | direkt ⁴⁾ | gesamt ⁵⁾ |
| | | MJ/kWh | MJ/kWh | g/kWh | g/kWh | g/kWh | g/kWh |
| Deutschland | 6,0 % | 3,6 | 10,0 | 0 | 564 | 0 | 589 |
| EU-27 + Türkei | 8,0 % | 3,6 | 10,1 | 0 | 403 | 0 | 424 |
| Belgien | 4,6 % | 3,6 | 11,7 | 0 | 210 | 0 | 223 |
| Bulgarien | 16,2 % | 3,6 | 11,4 | 0 | 635 | 0 | 664 |
| Dänemark | 5,1 % | 3,6 | 9,5 | 0 | 409 | 0 | 433 |
| Finnland | 3,4 % | 3,6 | 11,0 | 0 | 177 | 0 | 194 |
| Frankreich | 6,7 % | 3,6 | 12,5 | 0 | 76 | 0 | 81 |
| Griechenland | 9,1 % | 3,6 | 9,7 | 0 | 816 | 0 | 850 |
| Großbritannien | 8,4 % | 3,6 | 8,8 | 0 | 373 | 0 | 392 |
| Italien | 6,4 % | 3,6 | 8,3 | 0 | 425 | 0 | 450 |
| Niederlande | 3,8 % | 3,6 | 8,1 | 0 | 396 | 0 | 412 |
| Norwegen | 7,4 % | 3,6 | 4,4 | 0 | 24 | 0 | 25 |
| Österreich | 6,4 % | 3,6 | 5,9 | 0 | 171 | 0 | 186 |
| Polen | 11,1 % | 3,6 | 10,3 | 0 | 947 | 0 | 998 |
| Portugal | 8,3 % | 3,6 | 9,6 | 0 | 470 | 0 | 497 |
| Rumänien | 11,8 % | 3,6 | 9,1 | 0 | 527 | 0 | 551 |
| Russland | 11,0 % | 3,6 | 12,4 | 0 | 782 | 0 | 839 |
| Schweden | 7,6 % | 3,6 | 9,1 | 0 | 65 | 0 | 68 |
| Schweiz | 7,0 % | 3,6 | 8,6 | 0 | 48 | 0 | 52 |
| Slowakei | 5,0 % | 3,6 | 9,7 | 0 | 413 | 0 | 448 |
| Spanien | 9,2 % | 3,6 | 9,9 | 0 | 327 | 0 | 346 |
| Tschechien | 8,3 % | 3,6 | 11,1 | 0 | 580 | 0 | 596 |
| Türkei | 14,0 % | 3,6 | 9,0 | 0 | 649 | 0 | 679 |
| Ungarn | 10,3 % | 3,6 | 11,5 | 0 | 564 | 0 | 601 |
| Australien | 7,0 % | 3,6 | 10,2 | 0 | 872 | 0 | 902 |
| Brasilien | 15,8 % | 3,6 | 6,0 | 0 | 410 | 0 | 754 |
| China ⁶⁾ | 8,1 % | 3,6 | 9,4 | 0 | 749 | 0 | 884 |
| Indien ⁶⁾ | 12,0 % | 3,6 | 12,6 | 0 | 1.040 | 0 | 1.126 |
| Japan ⁶⁾ | 5,2 % | 3,6 | 10,2 | 0 | 494 | 0 | 520 |
| Südafrika | 12,0 % | 3,6 | 11,1 | 0 | 1.001 | 0 | 1.116 |
| USA | 6,7 % | 3,6 | 10,1 | 0 | 648 | 0 | 677 |

Abb. A.5.: Emissionsfaktoren unter Einbeziehung der Energievorkette [Kra11, S. 99]

A.6. Emissionsfaktoren für Erdgas

| Land | Umrechnungsfaktor von Brennwert in Heizwert ¹⁾ | Energieverbrauch | | CO ₂ -Emissionen | | THG-Emissionen (CO ₂ e) | |
|----------------|---|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| | | di- rekt ¹⁾ | ge- samt ²⁾ | di- rekt ¹⁾ | ge- samt ²⁾ | di- rekt ¹⁾ | ge- samt ²⁾ |
| | | MJ/kWh | MJ/kWh | g/kWh | g/kWh | g/kWh | g/kWh |
| Deutschland | 90,2 % | 3,60 | 4,12 | 201 | 223 | 202 | 249 |
| Belgien | 90,4 % | 3,60 | 3,92 | 206 | 218 | 206 | 235 |
| Bulgarien | 90,2 % | 3,60 | 4,72 | 200 | 240 | 201 | 329 |
| Dänemark | 90,4 % | 3,60 | 3,77 | 206 | 214 | 206 | 230 |
| Finnland | 90,4 % | 3,60 | 4,51 | 206 | 240 | 206 | 272 |
| Frankreich | 90,4 % | 3,60 | 4,15 | 206 | 225 | 206 | 250 |
| Griechenland | 90,4 % | 3,60 | 4,53 | 206 | 247 | 206 | 288 |
| Großbritannien | 90,4 % | 3,60 | 3,78 | 206 | 214 | 206 | 230 |
| Italien | 90,2 % | 3,60 | 4,16 | 199 | 224 | 199 | 253 |
| Niederlande | 90,2 % | 3,60 | 3,80 | 202 | 212 | 203 | 229 |
| Norwegen | 90,4 % | 3,60 | 3,78 | 206 | 214 | 206 | 219 |
| Österreich | 90,2 % | 3,60 | 4,32 | 199 | 226 | 199 | 264 |
| Polen | 90,1 % | 3,60 | 4,29 | 199 | 225 | 199 | 292 |
| Portugal | 90,2 % | 3,60 | 4,09 | 199 | 224 | 199 | 235 |
| Rumänien | 90,1 % | 3,60 | 4,70 | 199 | 240 | 199 | 329 |
| Russland | 90,1 % | 3,60 | 4,72 | 199 | 240 | 199 | 330 |
| Schweden | 90,4 % | 3,60 | 3,91 | 206 | 216 | 206 | 232 |
| Schweiz | 90,2 % | 3,60 | 4,08 | 199 | 216 | 199 | 230 |
| Slowakei | 90,1 % | 3,60 | 4,67 | 199 | 235 | 199 | 316 |
| Spanien | 90,2 % | 3,60 | 4,13 | 199 | 222 | 199 | 247 |
| Tschechien | 90,2 % | 3,60 | 4,12 | 199 | 218 | 199 | 281 |
| Türkei | 90,1 % | 3,60 | 4,65 | 199 | 240 | 199 | 321 |
| Ungarn | 90,1 % | 3,60 | 4,39 | 199 | 227 | 199 | 260 |
| Australien | 90,4 % | 3,60 | 3,81 | 206 | 217 | 206 | 222 |
| China | 90,2 % | 3,60 | 4,45 | 199 | 243 | 199 | 285 |
| Japan | 90,2 % | 3,60 | 4,49 | 199 | 250 | 199 | 270 |
| USA | 90,2 % | 3,60 | 3,83 | 199 | 213 | 199 | 218 |

¹⁾ Entspricht Tank-to-Wheel (TTW) bei Verkehrsmitteln. ²⁾ Entspricht Well-to-Wheel (WTW) bei Verkehrsmitteln.

Abb. A.6.: Länderspezifische Umrechnungsfaktoren für Erdgas [Kra11, S. 109]

A.7. Emissionsfaktoren für Kältemittel

| Kältemittel | Energieverbrauch | | CO ₂ -Emissionen | | THG-Emissionen (CO ₂ e) | |
|-------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------------------|----------------------|
| | direkt ¹⁾ | gesamt ²⁾ | direkt ¹⁾ | gesamt ²⁾ | direkt ¹⁾ | gesamt ²⁾ |
| | MJ/kg | MJ/kg | kg/kg | kg/kg | kg/kg | kg/kg |
| R22 | 0,0 | 116,0 | 0 | 5 | 1.810 | 1.886 |
| R134a | 0,0 | 160,6 | 0 | 7 | 1.430 | 1.533 |
| R404A | 0,0 | 160,6 | 0 | 7 | 3.922 | 4.025 |
| R407A | 0,0 | 151,7 | 0 | 6 | 1.770 | 1.873 |
| R410A | 0,0 | 138,3 | 0 | 6 | 2.088 | 2.177 |
| R422D | 0,0 | 155,1 | 0 | 6 | 2.729 | 2.829 |
| R717 | 0,0 | 13,6 | 0 | 2 | 3 | 5 |

¹⁾ Entspricht Tank-to-Wheel (TTW) bei Verkehrsmitteln. ²⁾ Entspricht Well-to-Wheel (WTW) bei Verkehrsmitteln.

Abb. A.7.: Umrechnungsfaktoren für Kältemittel [Kra11, S. 113]

A.8. Spezifischer Energieverbrauch von LKW

| | Mittleres Längs- neigungsprofil | | | Ebene | | |
|---|------------------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|----------------------------|----------------|
| | Volumen- gut | Durch- schnitts- gut | Massen- gut | Volumen- gut | Durch- schnitts- gut | Massen- gut |
| Frachtverkehr | Dieselverbrauch in Liter/tkm | | | | | |
| Lkw < 7,5 t zGG | 0,140 | 0,078 | 0,063 | 0,139 | 0,077 | 0,062 |
| Lkw < 7,5-12 t zGG | 0,108 | 0,061 | 0,050 | 0,105 | 0,059 | 0,048 |
| Lkw 12-24 t zGG | 0,063 | 0,036 | 0,029 | 0,060 | 0,034 | 0,027 |
| Last-/Sattelzug 24-40 t zGG | 0,038 | 0,023 | 0,020 | 0,033 | 0,020 | 0,016 |
| Containerverkehr | Dieselverbrauch in Liter/TEU-km | | | | | |
| Lkw < 7,5 t zGG | x | x | x | x | x | x |
| Lkw < 7,5-12 t zGG | x | x | x | x | x | x |
| Lkw 12-24 t zGG | 0,24 | 0,26 | x | 0,22 | 0,24 | x |
| Last-/Sattelzug 24-40 t zGG | 0,17 | 0,19 | 0,34 | 0,14 | 0,16 | 0,29 |
| x = Container-Transport für diese Lkw-Größe bzw. bei diesem Containergewicht nicht möglich. | | | | | | |

Abb. A.8.: Durchschnittswerte für den spezifischen Energieverbrauch [Kra11, S. 132]

A.9. Beladung eines LKW - Einflüsse

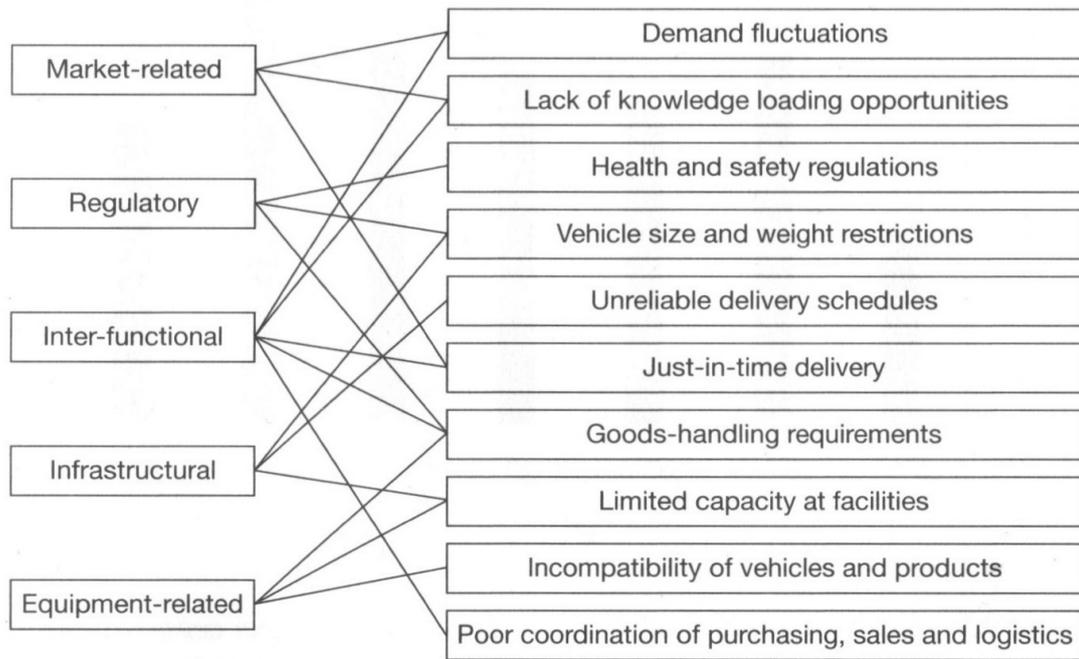


Abb. A.9.: Einschränkende Faktoren für die Beladung von LKW [McK+10, S. 199]

A.10. Berechnungen zu Beispielszenario 1

Energieverbrauch nach Formel 5.14:

$$EV_{LKW(m)} = (EV_{leer} + (EV_{voll} - EV_{leer}) \cdot \frac{m}{NL_{max}}) \cdot D$$

- Fahrzeug Nr. 1:

$$EV_{A \rightarrow B} = (13 \frac{l}{100 km} + (16,2 - 13) \frac{l}{100 km} \cdot \frac{3 t}{3,5 t}) \cdot 100 km = 15,74 l$$

$$EV_{B \rightarrow C} = (13 \frac{l}{100 km} + (16,2 - 13) \frac{l}{100 km} \cdot \frac{1,5 t}{3,5 t}) \cdot 100 km = 28,74 l$$

$$EV_{C \rightarrow A} = (13 \frac{l}{100 km} + (16,2 - 13) \frac{l}{100 km} \cdot \frac{0 t}{3,5 t}) \cdot 100 km = 65 l$$

- Fahrzeug Nr. 2:

$$EV_{A \rightarrow B} = (13 \frac{l}{100 km} + (16,2 - 13) \frac{l}{100 km} \cdot \frac{2,4 t}{2,4 t}) \cdot 100 km = 12,3 l$$

$$EV_{B \rightarrow C} = (10,1 \frac{l}{100 km} + (12,3 - 10,1) \frac{l}{100 km} \cdot \frac{1,2 t}{2,4 t}) \cdot 100 km = 22,4 l$$

$$EV_{C \rightarrow A} = (13 \frac{l}{100 km} + (12,3 - 10,1) \frac{l}{100 km} \cdot \frac{0 t}{2,4 t}) \cdot 100 km = 50,5 l$$

Transporteffizienz

$$TE_{EM} = \frac{FCO_2 \cdot EV}{m \cdot D}$$

- $TE_{EM} = \frac{2,65 kg CO_2 - eq \cdot 194,69}{1080 t \cdot km} = 0,48 \frac{kg CO_2 - eq}{t \cdot km}$

Fahrzeugeffizienz

$$FE = \frac{m \cdot D}{TP}$$

- $FE = \frac{1080 t \cdot km}{6} = 180 t \cdot km$

Auslastungsquote

$$AQ = \frac{m}{NL_{max}}$$

- $AQ = \frac{\frac{3 t}{3,5 t} + \frac{1,5 t}{3,5 t} + \frac{2,4 t}{2,4 t} + \frac{1,2 t}{2,4 t}}{6} = 0,46$

Leerfahrtenanteil

$$LF = \frac{D_{Leer}}{D_{Ges}}$$

- $LF = \frac{1000 km}{1600 km} = 0,63$

Literatur

- [Arn04] Dieter Arnold. *Handbuch Logistik: Mit 77 Tabellen*. 2. Aufl. VDI. Berlin u. a.: Springer, 2004. ISBN: 3540401105.
- [ASH98] ASHRAE. *1998 ASHRAE handbook: Refrigeration*. SI edition. Atlanta und GA: American Society of Heating, Refrigerating und Air-Conditioning Engineers, 1998. ISBN: 1883413540.
- [BMM05] Il'ja N. Bronštejn, Gerhard Musiol und Heiner Mühlig. *Taschenbuch der Mathematik*. 6., vollst. überarb. und erg. Aufl. Frankfurt am Main: Deutsch, 2005. ISBN: 3817120060.
- [BMU09] BMU. *Memorandum Product Carbon Footprint: Positionen zur Erfassung und Kommunikation des Product Carbon Footprint für die internationale Standardisierung und Harmonisierung*. Hrsg. von Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2009. URL: http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/memorandum_pcf_lang_bf.pdf (besucht am 17.12.2013).
- [BMU11] BMU. *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. Hrsg. von Bundesministerium für Umweltschutz, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2011. URL: http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf (besucht am 17.12.2013).
- [BMU12] BMU. *Produktbezogene Klimaschutzstrategien: Product Carbon Footprint verstehen und nutzen*. 1. Aufl. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2012.
- [BMU13] BMU. *Internationale Berichtspflichten*. Hrsg. von Bundesministerium für Umweltschutz, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2013. URL: <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/emissionsinventur/berichtspflichten-international/> (besucht am 17.12.2013).
- [BMU97] BMU. *Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen*. Hrsg. von Bundesministerium für Umwelt-

Literatur

- schutz, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 1997. URL: <http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/protodt.pdf> (besucht am 17.12.2013).
- [Bra11] Hans-Hermann Braess. *Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 6., aktualisierte u. erw. Aufl. ATZ-MTZ Fachbuch. Wiesbaden: Vieweg & Teubner, 2011. ISBN: 978-3-8348-1011-3.
- [Cla+01] Jens Clausen, Thomas Loew, Kathrin Klaffke, Michaela Raupach und Ingo Schoenheit. *Der Nachhaltigkeitsbericht: Ein Leitfaden zur Praxis glaubwürdiger Kommunikation für zukunftsfähige Unternehmen*. Berlin: IÖW - Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, 2001.
- [Dal13] Jörg Dallmeyer. „Akteursorientierte multimodale Straßenverkehrssimulation“. Diss. Frankfurt am Main: Johann Wolfgang Goethe-Universität, 2013. URL: <http://publikationen.uni-frankfurt.de/files/31137/DissertationJD.pdf> (besucht am 17.12.2013).
- [DEF10] DEFRA-DECC. *Guidance on measuring and reporting Greenhouse Gas (GHG) emissions from freight transport operations*. Hrsg. von Department for Environment, Food and Rural Affairs. 2010. URL: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/218574/ghg-freight-guide.pdf (besucht am 17.12.2013).
- [DIN06] DIN. *DIN EN ISO 14040:2006: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 01.10.2006.
- [DIN09] DIN. *DIN EN ISO 14044:2006: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 01.11.2009.
- [DIN12a] DIN. *DIN EN ISO 14064-1: Treibhausgase - Teil 1: Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und Entzug von Treibhausgasen auf Organisationsebene*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 01.05.2012.
- [DIN12b] DIN. *DIN ISO 14067.2:2012: Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für quantitative Bestimmung und Kommunikation*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 12.11.2012.
- [DIN13a] DIN. *DIN ISO 8855:2011: Straßenfahrzeuge - Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten - Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 01.11.2013.

Literatur

- [DIN13b] DIN. *DIN EN 16258:2012: Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 03.2013.
- [DIN95] DIN. *DIN 1319-1: Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 09.01.1995.
- [EAN13] EA-NRW. *Kälteerzeugung - Potenziale zur Energieeinsparung*. Hrsg. von EnergieAgentur.NRW. 2013.
- [EPM13] Francisco Estrada, Pierre Perron und Benjamin Martinez-Lopez. *Statistically derived contributions of diverse human influences to twentieth-century temperature changes*. Hrsg. von Nature Geoscience. 2013. URL: <http://www.nature.com/ngeo/journal/vaop/ncurrent/full/ngeo1999.html> (besucht am 17. 12. 2013).
- [Eri00a] Eva Ericsson. „Driving pattern in urban areas: descriptive analysis and initial prediction model“. In: *Bulletin* 185 (2000). ISSN: 1404-272X.
- [Eri00b] Eva Ericsson. „Measuring vehicle driving patterns: Estimating the influence of different measuring intervals“. In: *Proceedings from the 2nd KFB Research Conference in Lund* (2000), S. 9–20.
- [eSA13] e-SAVE. *Project Objectives*. 2013. URL: http://www.e-save.eu/?page_id=19 (besucht am 18. 12. 2013).
- [EU09] EU. *Richtlinie 2009/28/EG (Erneuerbare-Energien-Richtlinie)*. Hrsg. von {Europäisches Parlament} und {Europäischer Rat}. 2009. URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:DE:PDF> (besucht am 17. 12. 2013).
- [Eur07] Eurostat. „Durchschnittliche Ladungsgewichte, Entfernungen und Leerfahrten im Güterkraftverkehr - 2005“. In: *Statistics in Focus - Transport* 117 (2007). URL: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-SF-07-117/DE/KS-SF-07-117-DE.PDF.
- [Fri13] Birgit Friedl. *Controlling*. 2., vollst. neu bearb. Aufl. Bd. Nr. 8528 : Betriebswirtschaftslehre. Unternehmensführung. Konstanz und München: UVK-Verl.-Ges und UVK/Lucius, 2013. ISBN: 3825285286.
- [Gle01] Ronald Gleich. *Das System des Performance measurement: Theoretisches Grundkonzept, Entwicklungs- und Anwendungsstand*. München: Vahlen, 2001. ISBN: 3-8006-2707-8.

Literatur

- [Glo06] Global Reporting Initiative. *Sustainability Reporting Guidelines*. Hrsg. von Global Reporting Initiative. 2006. URL: <https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/G3-Guidelines-Incl-Technical-Protocol.pdf> (besucht am 17.12.2013).
- [Hal00] Jeremy Hall. „Environmental supply chain dynamics“. In: *Journal of Cleaner Production* 8.6 (2000), S. 455–471. ISSN: 0959-6526.
- [Hil08] Dennis Hilgers. *Performance Management: Leistungserfassung und Leistungssteuerung in Unternehmen und öffentlichen Verwaltungen*. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008. ISBN: 978-3-8349-9741-8.
- [Hoc09] Christian Hochfeld. *Product Carbon Footprinting: Status Quo und Perspektiven in KMU*. Hrsg. von TÜV Rheinland. 2009. URL: https://www.tuv.com/media/germany/50_trainingandconsulting/pdf/csr_1/Product_Carbon_Footprint.pdf (besucht am 17.12.2013).
- [Hor09] Péter Horváth. *Controlling*. 11., vollst. überarb. Aufl. Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. München: Vahlen, 2009. ISBN: 9783800635214.
- [Hou01] J. T. Houghton. *Climate change 2001: The scientific basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. ISBN: 9780521014953.
- [Ich13] Petra Icha. „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012“. In: *Climate Change (BMU)* 7 (2013), S. 1–18.
- [ife11] ifeu. *EcoTransit: Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports: Methodology and Data Update*. Hrsg. von Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. 2011. URL: http://www.ecotransit.org/download/ecotransit_background_report.pdf (besucht am 17.12.2013).
- [ife12] ifeu. *Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoff-emissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 (TREMODO, Version 5.3) für die Emissionberichterstattung 2013: Endbericht*. Hrsg. von Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. 2012. URL: [https://www.ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/IFEU\(2012\)_Bericht%20TREMODO%20FKZ%20360%2016%20037_121113.pdf](https://www.ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/IFEU(2012)_Bericht%20TREMODO%20FKZ%20360%2016%20037_121113.pdf) (besucht am 17.12.2013).
- [Ihl06] Claus Ihle. *Klimatechnik mit Kältetechnik*. 4. Aufl. Bd. Bd. 4. Neuwied: Werner, 2006. ISBN: 9783804121461.

Literatur

- [IIN13] IINAS. *GEMIS download*. Hrsg. von Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -Strategien. 2013. URL: <http://www.iinas.org/gemis-download-de.html> (besucht am 17. 12. 2013).
- [IPC07] IPCC. *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change*. Hrsg. von IPCC. 2007. URL: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg3_report_mitigation_of_climate_change.htm (besucht am 17. 12. 2013).
- [IPC13a] IPCC. *Klimawandel 2013: Physikalische Grundlagen - Hauptaussagen aus der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger*. Hrsg. von Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. URL: http://www.de-ipcc.de/_media/IPCC-WGI-Headlines-deutsch.pdf (besucht am 17. 12. 2013).
- [IPC13b] IPCC. *Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Hrsg. von IPCC. 2013. URL: http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI-12Doc2b_FinalDraft_Chapter08.pdf (besucht am 17. 12. 2013).
- [KA10] Hans-Ulrich Krause und Dayanand Arora. *Controlling-Kennzahlen: Zweisprachiges Handbuch Deutsch/Englisch ; [mit CD-ROM] = Key performance indicators*. 2., überarb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg, 2010. ISBN: 348659690X.
- [KB07] Martin Kütz und Peter Bachmann. *Kennzahlen in der IT: Werkzeuge für Controlling und Management*. 2., überarb. und erw. Aufl. Heidelberg: dpunkt-Verl, 2007. ISBN: 3898644057. URL: http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2831831%5C&prov=M%5C&dok_var=1%5C&dok_ext=htm.
- [Ker71] Werner Kern. „Kennzahlensysteme als Niederschlag interdependenter Unternehmensplanung“. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaftliche Forschung* 23 (1971), S. 701–718. ISSN: 0341-2687.
- [KI12] Florian Kellner und Johannes Igl. „Estimating the effect of changing retailing structures on the greenhouse gas performance of FMCG distribution networks“. In: *Logistics Research* 4.3-4 (2012), S. 87–99. ISSN: 1865-035X. DOI: 10.1007/s12159-012-0063-3. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s12159-012-0063-3>.
- [Kra11] Andre Kranke. *CO₂-Berechnung in der Logistik: Datenquellen, Formeln, Standards*. 1. Aufl. Verkehrs-Rundschau. München: Vogel, 2011. ISBN: 9783574260957.

Literatur

- [Log13] Logistik Heute. „Gut gemessen ist halb geliefert“. In: *Logistik Heute* 5 (2013), S. 50–51. ISSN: 0173-6213.
- [Mar02] Heinrich Martin. *Transport- und Lagerlogistik: Planung, Aufbau und Steuerung von Transport- und Lagersystemen ; mit 44 Tabellen*. 4., überarb. und erw. Aufl. Viewegs Fachbücher der Technik. Braunschweig [u.a.]: Vieweg, 2002. ISBN: 3528349417.
- [Mar10] Clive Marchant. „Reducing the environmental impact of warehousing“. In: *Green logistics*. Hrsg. von Alan C. McKinnon, Sharon Cullinane, Michael Browne und Anthony Whiteing. London und Philadelphia: Kogan Page, 2010, S. 167–192. ISBN: 9780749456788.
- [McK+10] Alan C. McKinnon, Sharon Cullinane, Michael Browne und Anthony Whiteing, Hrsg. *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics*. London und Philadelphia: Kogan Page, 2010. ISBN: 9780749456788.
- [McK10a] Alan McKinnon. „Environmental sustainability: A new priority for logistics managers“. In: *Green logistics*. Hrsg. von Alan C. McKinnon, Sharon Cullinane, Michael Browne und Anthony Whiteing. London und Philadelphia: Kogan Page, 2010, S. 3–30. ISBN: 9780749456788.
- [McK10b] Alan McKinnon. „Increasing fuel efficiency in the road freight sector“. In: *Green logistics*. Hrsg. von Alan C. McKinnon, Sharon Cullinane, Michael Browne und Anthony Whiteing. London und Philadelphia: Kogan Page, 2010, S. 229–241. ISBN: 9780749456788.
- [ME10] Alan McKinnon und Julia Edwards. „Opportunities for improving vehicle utilization“. In: *Green logistics*. Hrsg. von Alan C. McKinnon, Sharon Cullinane, Michael Browne und Anthony Whiteing. London und Philadelphia: Kogan Page, 2010, S. 195–213. ISBN: 9780749456788.
- [MK10] Alan McKinnon und Andre Kreie. *Adaptive Logistics: Preparing Logistical Systems for Climate Change: Paper to be presented at the Logistics Research Network Conference in Harrogate, 8-10 Sept 2010*. 2010. URL: <http://www.greenlogistics.org/SiteResources/15thLRN/McKinnon%20and%20Kreie%20Adaptive%20Logistics.pdf> (besucht am 17.12.2013).
- [Par10] David Parmenter. *Key performance indicators: Developing, implementing, and using winning KPIs*. 2nd ed. Hoboken und N.J.: John Wiley & Sons, 2010. ISBN: 0470545151.

Literatur

- [PCF13] PCF-Projekt. *Product Carbon Footprint*. Hrsg. von PCF-Projekt. 2013. URL: <http://www.pcf-projekt.de/main/background/product-carbon-footprint/> (besucht am 17.12.2013).
- [Peh+08] M. Pehnt, D. Seebach, W. Irrek und D. Seifried. *Umweltnutzen von Ökostrom: Vorschlag zur Berücksichtigung in Klimaschutzkonzepten*. Hrsg. von Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. 2008. URL: http://www.ifeu.de/energie/pdf/Diskussionspapier0ekostrom_%20ifeu0eko%20WI%20e2%20final1.pdf (besucht am 17.12.2013).
- [Poh08] Pohlmann. *Pohlmann-Taschenbuch der Kältetechnik: Grundlagen, Anwendungen, Arbeitstabellen und Vorschriften*. 19., überarb. u. erw. Aufl. Heidelberg und Neckar: Müller, C F in Hüthig, 2008. ISBN: 978-3-7880-7824-9.
- [RD12] M. Rabe und M. Deininger. „State of art and research demands for simulation modeling of green supply chains“. In: *International Journal of Automation Technology* 6.3 (2012), S. 296–303. ISSN: 1881-7629.
- [Rei01] Thomas Reichmann. *Controlling mit Kennzahlen und Managementberichten: Grundlagen einer systemgestützten Controlling-Konzeption*. 6., überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen, 2001. ISBN: 3800625318.
- [Rei08] Klaus Reisner. *Fachwissen Kältetechnik: Eine Einführung für die Aus- und Weiterbildung mit Aufgaben und Lösungen*. 4., völlig neu bearb. und erw. Aufl. Heidelberg: C.F. Müller, 2008. ISBN: 9783788077853.
- [Rei11] Thomas Reichmann. *Controlling mit Kennzahlen: Die systemgestützte Controlling-Konzeption mit Analyse- und Reportinginstrumenten*. 8., überarb. und erw. Aufl. Controlling Competence. München: Vahlen, 2011. ISBN: 9783800638000.
- [RGF13] M. Rabe, Kai Gutenschwager und Till Fechteler. *A Data Model for Carbon Footprint Simulation in Consumer Goods Supply Chains*. Unveröffentlichter Artikel, Dortmund. 2013.
- [RL76] Thomas Reichmann und Laurenz Lachnit. „Planung, Steuerung und Kontrolle mit Hilfe von Kennzahlen“. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaftliche Forschung* 28.11 (1976), S. 705–723. ISSN: 0341-2687.
- [San05] Joachim Sandt. „Performance measurement“. In: *ZfCM* 49.6 (2005), S. 429–447. ISSN: 1614-1822; 0931-9077.
- [Sta85] Erich Staudt. *Kennzahlen und Kennzahlensysteme: Grundlagen zur Entwicklung und Anwendung ; Bibliographie deutschsprachiger Veröffentlichun-*

Literatur

- gen ; praxisorientierte Literaturlauswertung*. Berlin: Schmidt, 1985. ISBN: 3503024875.
- [SV13] Sven Spieckermann und Stefan Voß. *Simulation*. Hrsg. von Technische Universität Braunschweig. 2013. URL: http://iwi.econ.uni-hamburg.de/IWIWeb/uploads/skript_sim107532888.pdf (besucht am 17.12.2013).
- [Sys90] A. Syska. *Kennzahlen für die Logistik*. Bd. Bd. 31. FIR + IAW, Forschung für die Praxis. Berlin und New York: Springer, 1990. ISBN: 354053296x.
- [UN87] UN. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. 1987. URL: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm> (besucht am 17.12.2013).
- [UNE12] UNEP. *Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. Nairobi und Kenia, 2012. ISBN: 978-9966-20-009-9.
- [UNF05] UNFCCC. *Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol on its first session, held at Montreal: Part Two: Action taken by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol at its first session*. Hrsg. von UNFCCC. 2005. URL: <http://unfccc.int/resource/docs/2005/cmp1/eng/08a03.pdf> (besucht am 17.12.2013).
- [UNF13] UNFCCC. *First steps to a safer future: Introducing The United Nations Framework Convention on Climate Change*. Hrsg. von UNFCCC. 2013. URL: http://unfccc.int/essential_background/convention/items/6036.php (besucht am 17.12.2013).
- [VI 11] VI e.V. *Umfrage Nachhaltigkeit*. Hrsg. von Verbraucher Initiative e.V. 2011. URL: <http://www.verbraucher.org/pdf/295.pdf> (besucht am 17.12.2013).
- [Wag+07] Hermann-Josef Wagner, Marco K. Koch, Jörg Burkhardt, Thomas Böckmann, Norbert Feck und Philip Kruse. „CO2-Emissionen der Stromerzeugung: Ein ganzheitlicher Vergleich verschiedener Techniken“. In: *Energiefachmagazin BWK* 59.10 (2007), S. 44–52. ISSN: 1618-193X.
- [Wer05] Frank Werner. „Global Reporting Initiative: Berichterstattung in Zeiten der Globalisierung“. In: *Sozial- und Umweltstandards bei Unternehmen: Chancen und Grenzen*. Hrsg. von Christian Bussler Bussler und Alexander Fonari. München: Eine Welt Netzwerk Bayern, 2005, S. 67–74.

Literatur

- [Wor13] World Meteorological Organization. *Understanding Climate: What is Climate?* Hrsg. von World Meteorological Organization. 2013. URL: http://www.wmo.int/pages/themes/climate/understanding_climate.php (besucht am 17.12.2013).
- [WRI13] WRI. *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*. 2013. URL: <http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/public/ghg-protocol-revised.pdf> (besucht am 17.12.2013).

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----------|---|----|
| Abb. 2.1: | Schematische Darstellung der Komponenten des Klimasystems [IPC07, S. 104] | 6 |
| Abb. 2.2: | Schematische Darstellung einer ausgeglichenen Energiebilanz des Klimasystems [IPC07, S. 96] | 7 |
| Abb. 2.3: | Schematische Darstellung des „stratospheric-adjustment“ nach [IPC07, S. 134] | 8 |
| Abb. 2.4: | Phasen und Anwendung einer LCA-Studie nach [DIN09, S. 16] | 16 |
| Abb. 2.5: | Standards zum PCF nach [Hoc09] | 17 |
| Abb. 2.6: | Schematischer Ablauf zur Erhebung eines PCF nach [BMU12] | 19 |
| Abb. 3.1: | Die Zahlenarten nach [Sta85] | 20 |
| Abb. 3.2: | Übersicht und Herkunft der abgeleiteten KPI-Kriterien | 25 |
| Abb. 4.1: | Schematische Darstellung der Systemgrenzen dieser Arbeit | 29 |
| Abb. 5.1: | Abhängigkeit des Umrechnungsfaktors von der Technik der Stromerzeugung und der Datenbasis [Wag+07, S. 50] | 34 |
| Abb. 5.2: | Abhängigkeit des Umrechnungsfaktors vom Alter von Biostromanlagen [Peh+08, S. 11] | 36 |
| Abb. 6.1: | Kräftegleichgewicht am ruhenden LKW | 50 |
| Abb. 6.2: | Schematische Darstellung der Abhängigkeiten und Parameter der Verbrauchsrate und des Energiverbrauchs eines LKW | 52 |
| Abb. 7.1: | Kategorisierung der KPI für den Transportprozess | 56 |
| Abb. 7.2: | Beispiel - die Streckenabschnitte | 61 |
| Abb. 7.3: | Kategorisierung der KPI für den Lagerprozess | 68 |
| Abb. A.1: | Beispiel eines Produktsystems einer LCA-Studie [DIN09, S. 21] | 78 |
| Abb. A.2: | Bestandteile der Wirkungsabschätzung einer LCA-Studie [DIN09, S. 29] | 79 |
| Abb. A.3: | Beispielhafte Darstellung eines Prozessnetzes einer PCF-Erhebung [BMU12, S. 31] | 80 |
| Abb. A.4: | Kohlendioxidemissionen der Stromerzeugung, Stromverbrauch und CO ₂ -Emissionsfaktor des Stroms [Ich13, S. 2] | 81 |
| Abb. A.5: | Emissionsfaktoren unter Einbeziehung der Energievorkette [Kra11, S. 99] | 82 |
| Abb. A.6: | Länderspezifische Umrechnungsfaktoren für Erdgas [Kra11, S. 109] | 83 |
| Abb. A.7: | Umrechnungsfaktoren für Kältemittel [Kra11, S. 113] | 84 |
| Abb. A.8: | Durchschnittswerte für den spezifischen Energiverbrauch [Kra11, S. 132] | 85 |

Abbildungsverzeichnis

Abb. A.9: Einschränkende Faktoren für die Beladung von LKW [McK+10, S. 199] 86

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tab. 2.1: GWP verschiedener THG aus [IPC07, S. 33] | 9 |
| Tab. 7.1: Der KPI Transporteffizienz | 57 |
| Tab. 7.2: Der KPI Fahrzeugeffizienz | 58 |
| Tab. 7.3: Der KPI Auslastungsquote | 59 |
| Tab. 7.4: Der KPI Leerfahrtenanteil | 59 |
| Tab. 7.5: Beispiel - die Fahrzeugdaten (aus [Kra11, S. 148]) | 61 |
| Tab. 7.6: Beispiel - Zuladungstabelle zu Szenario 1 | 62 |
| Tab. 7.7: Beispiel - Zuladungstabelle zu Szenario 2 | 62 |
| Tab. 7.8: Beispiel - Zuladungstabelle zu Szenario 3 | 63 |
| Tab. 7.9: Der KPI durchschnittliche positive Beschleunigung (RPA) | 65 |
| Tab. 7.10: Der KPI durchschnittliche Transportdistanz | 67 |
| Tab. 7.11: Der KPI Lagereffizienz | 68 |
| Tab. 7.12: Der KPI Ökostromanteil | 69 |
| Tab. 7.13: Der KPI Außenflächen-Volumen-Verhältnis | 70 |
| Tab. 7.14: Der KPI Türöffnungszeitanteil | 70 |
| Tab. 7.15: Der KPI Kälteleistungsgrad | 71 |

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift