



Logistik, Infrastruktur und Mobilität (M. Sc.)

Studienarbeit Logistik, Infrastruktur und Mobilität

**Entwicklung und Anwendung eines Tools zur Berechnung
von Product Carbon Footprints in der metallverarbeitenden
Industrie**

Prüfer:

Prof. Dr. Christian Thies

Vorgelegt und verfasst von:

Herr Dietze

Matrikelnummer: 570837

malte.dietze@tuhh.de

Tel.: +49 176 40483623

Hamburg, 10.05.2024

Entwicklung und Anwendung eines Tools zur Berechnung von Product Carbon Footprints in der metallverarbeitenden Industrie

Von Unternehmen wird zunehmend gefordert, dass sie die Umweltwirkungen ihrer Produkte erfassen und ausweisen. Im besonderen Fokus stehen dabei die Auswirkungen auf den Klimawandel, welche im Zusammenhang mit der Emission von Treibhausgasen stehen und häufig als sogenannter CO₂-Fußabdruck bzw. Product Carbon Footprint (PCF) ausgedrückt werden. Viele größere Unternehmen, die bereits über ein ausgeprägtes Nachhaltigkeitsmanagement verfügen, fordern inzwischen von ihren Lieferanten, bei denen es sich oftmals um kleine und mittlere Unternehmen mit weniger Erfahrung und Ressourcen in diesem Bereich handelt, PCF-bezogene Informationen ein.

Die Ermittlung von PCFs basiert üblicherweise auf einer standardisierten Methodik (vgl. u. a. ISO 14067:2018). Häufig mangelt es aber an konkreten Hinweisen, wie die Methodik auf spezifische Produkte anzuwenden ist. Typische Fragestellungen in Unternehmen der verarbeitenden Industrie umfassen u.a. die Festlegung geeigneter Systemgrenzen, die Allokationen von prozess- und betriebsbezogenen Auswirkungen auf einzelne Produkte, die Behandlung von Nebenprodukten und Ausschuss, den Umgang mit fehlenden Daten sowie die systematische PCF-Berechnung mittels geeigneter Tools.

Vor diesem Hintergrund besteht die Zielsetzung dieser Studienarbeit in der Entwicklung eines Tools zur Berechnung von Product Carbon Footprints unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen von kleinen und mittleren Unternehmen in der metallverarbeitenden Industrie. Hierzu sollen zunächst die konzeptionellen und methodischen Grundlagen von PCFs aufgearbeitet werden. Das Tool soll in einer gängigen Tabellenkalkulationssoftware (z.B. MS Excel) implementiert werden. Die Anwendung soll anhand eines exemplarischen Bauteils (in Abstimmung mit dem Betreuer) demonstriert werden. Bei fehlenden Daten sollen literaturbasierte Schätzungen vorgenommen werden. Die Berechnungsergebnisse sollen visualisiert, analysiert und kritisch diskutiert werden, um darauf aufbauend Handlungsempfehlungen zur Verringerung des PCFs abzuleiten.

Im Einzelnen sind die folgenden Teilaufgaben zu bearbeiten:

- Aufarbeitung der konzeptionellen und methodischen Grundlagen von PCFs
- Entwicklung und Implementierung eines Tools zur PCF-Berechnung
- Anwendung des Tools zur Ermittlung des PCF eines exemplarischen Bauteils
- Diskussion der Ergebnisse und Durchführung von Sensitivitätsanalysen
- Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Verringerung des PCFs
- Kritische Würdigung des eigenen Vorgehens und der Ergebnisse
- Präsentation der Ergebnisse

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	IX
1. Einleitung	1
1.1. Ausgangslage und Problemstellung	1
1.2. Zielsetzung und Vorgehensweise	2
2. Product Carbon Footprint	3
2.1. Die Rolle anthropogener Treibhausgase und ihr Beitrag zur globalen Erwärmung	3
2.2. Ökobilanz und CO ₂ -Fußabdruck	3
2.2.1. Ökobilanz	4
2.2.2. CO ₂ -Fußabdruck	4
2.3. Treiber der benötigten PCF-Angaben	5
2.4. Anforderungen an KMUs der Metallbranche	7
2.5. Standards und Normen zur Berechnung des PCFs	8
2.5.1. ISO 14040 und ISO 14044 zur Ökobilanz	8
2.5.2. Publicly Available Specifications (PAS) 2050	8
2.5.3. Greenhouse Gas Protocol von 2011	9
2.5.4. ISO 14067 (2018)	9
2.5.5. Vergleich der Normen	10
3. Leitfaden zur Erhebung eines PCFs	12
3.1. Zielfestlegung	12
3.2. Produktauswahl	12
3.3. Funktionelle Einheit	13

3.4.	Das Produktsystem	13
3.5.	Systemgrenzen	14
3.6.	Fließbild.....	14
3.7.	Nebenprodukte, Recycling und Ausschuss	15
3.8.	Umgang mit fehlenden und fraglichen Daten	15
3.9.	Auswahl der geeigneten Norm	16
4.	Tool-Entwicklung	16
4.1.	Anwendung	16
4.2.	Datengrundlage.....	20
4.3.	CO ₂ -Faktoren für Energieträger (EGT).....	21
4.4.	Alph. Aufstellung der Res.	22
4.5.	Pivot	22
5.	Tool-Anwendung am Beispiel eines Bolzens.....	22
5.1.	Zielfestlegung	22
5.2.	Produktauswahl.....	23
5.3.	Funktionelle Einheit	23
5.4.	Das Produktsystem	23
5.5.	Systemgrenzen	23
5.6.	Stoffflussanalyse	24
5.6.1.	Prozessübersicht.....	24
5.6.2.	Datenermittlung für die Bolzenherstellung	25
5.7.	Eingabe der Daten in das Excel-Tool	28
5.8.	Bewertung der Ergebnisse	29
5.9.	Nebenprodukte, Recycling und Ausschuss	29
5.10.	Bewertung der Ergebnisse	29
5.10.1.	Handlungsempfehlungen.....	29
5.10.2.	Vergleichsprozess	30
6.	Schlussteil	32

6.1.	Kritische Wertung	32
6.1.1.	Fazit	32
6.1.2.	Limitation.....	33
6.1.3.	Ausblick.....	34
6.2.	Zusammenfassung.....	35
A.	Eidesstaatliche Erklärung	a
B.	Literaturverzeichnis	b

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Normen/Standards.....	11
--	----

Abkürzungsverzeichnis

BSI	British Standard Institute
CCF	Corporate Carbon Footprint
EU-ETS	Europäische-Emissionshandel
GWP	Global Warming Potential
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
LCA	Life Cycle Assessment
PAS	Public Available Specification
PCA	Product Cycle Assessment
PCF	Product Carbon Footprint
THG	Treibhausgas
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
WIR	World Ressource Institute

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bilanzrahmen und Systematische Allokation von THG-Emissionen	14
Abbildung 2: Excel-Tool – Anwendung	16
Abbildung 3: Excel-Tool – Oberkategorie einfügen	17
Abbildung 4: Excel Tool: Unterkategorie einfügen	18
Abbildung 5: Excel-Tool – Dashboard	20
Abbildung 6: Excel-Tool – Ausschnitt CO ₂ -Faktoren für EGT	21
Abbildung 7: Stoffflussanalyse der Bolzenherstellung	24
Abbildung 8: Excel-Tool – Implementierte Daten des Bolzens	28
Abbildung 9: Excel-Tool – Vergleichsprozess.....	31
Abbildung 10: Excel-Tool: Dashboard – Oberkategorien.....	31
Abbildung 11: Excel-Tool: Dashboard - Differenz nach Oberkategorien	32

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage und Problemstellung

Die Gesellschaft sieht sich einer Vielzahl verheerender Probleme gegenüber, darunter der Klimawandel, die Ressourcenknappheit und die Energiekrise. Diese drängen Staat, Wirtschaft und Gesellschaft dazu, ihre Handlungen in Bezug auf Nachhaltigkeit zu überdenken (vgl. Zabel 2011, S. 339 f.). Dabei spielt das CO₂-Management eine entscheidende Rolle, insbesondere wenn der Fokus auf dem größten Verursacher liegt: dem Wirtschaftssektor (vgl. Günther et al. 2007, S. 1 f.). Tatsächlich zeigt eine Untersuchung des Umweltbundesamts aus dem Jahr 2020, dass das verarbeitende Gewerbe in Deutschland für 16,2 % und Industrieprozesse für 7,9 % der deutschen Gesamtemissionen verantwortlich waren (vgl. Umweltbundesamt 2021).

Der steigenden Bedeutung des Umweltschutzes und des Klimawandels entsprechend entstehen kontinuierlich neue Vorgaben zur Senkung von lokalen und globalen Schadstoffemissionen. Infolgedessen beschäftigen sich insbesondere Automobilhersteller verstärkt damit, ihre gesamte Wertschöpfungskette zu dekarbonisieren (vgl. Kaul et al. 2020, S. 4 ff.). Während große Konzerne die CO₂-neutrale Produktion anstreben, stehen kleine und mittelständische Unternehmen (KMUs) bei der Umstellung vor erheblichen Herausforderungen (vgl. Weidema et al. 2008, S. 3 ff.; Draucker et al. 2011, S. 3 ff.). Vor allem hohe Kosten für eine nachhaltige Transformation sind davon betroffen. Das Fehlen entsprechender Zertifikate kann für sie das Ausscheiden aus dem Markt bedeuten (vgl. Buchenau et al. 2019). In der Automobilindustrie beispielsweise entfallen etwa 70 % der Wertschöpfung auf Zulieferer, während die verbleibenden 30 % von den Herstellern selbst erbracht werden (vgl. Sachs 2018, S. 5), entsprechend hoch ist der Anteil der Lieferanten an den Schadstoffemissionen.

Für Unternehmen gestaltet es sich oft schwierig zu bestimmen, wie sich der sogenannte CO₂-Fußabdruck / Product Carbon Footprint (PCF) eines Produktes berechnen lässt. Inzwischen existieren zahlreiche Definitionen, Vorschläge und standardisierte Methoden, um den PCF zu berechnen. Diese umfassen unter anderem das „Greenhouse Gas Protocol“, das aus verschiedenen ISO-Normen besteht, den „British Standard“, die „Public Available Specification“ (PAS) usw. (vgl. Weidema et al. 2008, S. 3 ff.).

1.2. Zielsetzung und Vorgehensweise

Vor dem Hintergrund des in Abschnitt 1.1 beschriebenen Problems zielt die vorliegende Arbeit darauf ab, mögliche standardisierte Berechnungsmethoden für den PCF aufzuzeigen und eine geeignete Methode für KMUs der Metallbranche vorzustellen. Anschließend soll, basierend auf der gewählten Berechnungsmethode, ein Tool entwickelt werden, um den PCF eines einzelnen Produkts eines Unternehmens detailliert zu berechnen.

Die Ausarbeitung der Literaturrecherche wurde mit folgenden Schlüsselwörtern durchgeführt:

- Product Carbon Footprint (PCF)
- CO₂-Fußabdruck
- Treibhausgase (Reduzierung)
- Normen/Standards PCF
- Berechnung PCF

Bei der Verwendung dieser Schlüsselbegriffe wurde zusätzlich das Schneeballverfahren angewendet, um systematisch relevante Fachliteratur zu identifizieren. Dieses Verfahren ermöglichte es, zunächst eine Kernauswahl an einschlägigen Publikationen zu treffen und anschließend durch deren Referenzen weitere relevante Quellen zu erschließen. Auf diese Weise konnte ein breites Spektrum an wissenschaftlichen Arbeiten und Berichten zu dem PCF und dessen Berechnung erfasst werden.

Da es für die Ausarbeitung eines Konzepts zu dem PCF viele verschiedene Ansätze gibt, die unter anderem auf unterschiedlichsten Normen, Standards und Grundlagen basieren, orientiert sich diese Hausarbeit für die Leitfadenerstellung auf dem Werk von Hottenroth et al. Dabei werden die Erkenntnisse anderer Autoren und Standards zur Berechnung des PCFs an sinnvollen Stellen ergänzt (vgl. Hottenroth et al. 2013).

Des Weiteren wurden sechs verschiedene Open-Source-Programme zur Berechnung von Ökobilanzen untersucht, um ein tieferes Verständnis dafür zu entwickeln, wie genau die Berechnung eines PCFs dargestellt werden kann. Diese Erkenntnisse waren relevant für die Entwicklung des Excel-Tools.

2. Product Carbon Footprint

Im folgenden Kapitel wird ein breites Verständnis und eine Definition des PCFs herausgearbeitet. Darüber hinaus werden die Treiber und die Anforderungen an KMUs in der metallverarbeitenden Industrie erläutert. Der letzte Abschnitt des Kapitels beschreibt und vergleicht die relevantesten Normen zur Berechnung des PCFs.

2.1. Die Rolle anthropogener Treibhausgase und ihr Beitrag zur globalen Erwärmung

Die Erdtemperatur ist in Laufe des letzten Jahrhunderts im Mittel 0,6 bis 0,8 °C angestiegen. Zurückzuführen ist diese Korrelation auf die erhöhte Menge THG-Emissionen in der Atmosphäre, durch welche „das sichtbare Licht (kurzwellige elektromagnetische Wellen) in Wärme (längerwellige elektromagnetische Wellen, Infrarot-Strahlung)“ (Zahoransky 2015, S. 573) umgewandelt wird und so nur in abgeschwächter Form zurück an das Weltall abgegeben werden kann. Dieser Effekt für die Erwärmung wird von Gewächshäusern genutzt, daher der Begriff „Gewächshauseffekt“ (vgl. Zahoransky 2015, S. 573 f.).

Es gibt viele verschiedene Gase, die eine Treibhauswirkung haben. Gemäß dem IPCC-Bericht „Climate Change 2014“ haben die (anthropogenen) Treibhausgase seit der vorindustriellen Ära zugenommen und sind höchstwahrscheinlich die Hauptursache für die Erderwärmung. Laut Kyoto-Protokoll sind folgende Gase betroffen im Speziellen betroffen: Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) sowie die fluorierten Gase (F-Gase: HFKW, FKW, NF₃, SF₆) (vgl. Pachauri und Mayer 2015, S. 5). Um die einzelnen Gase hinsichtlich ihrer Klimaauswirkungen zu vergleichen, wird das Global Warming Potential (GWP) in Kilogramm CO₂-Äquivalenten für den üblicherweise verwendeten Zeitraum von 100 Jahren herangezogen, wobei Kohlenstoffdioxid den größten Anteil ausmacht (vgl. Hottenroth et al. 2013, S. 4 ff.). Weil das CO₂ am stärksten und produziert wird und damit das größte Erderwärmungspotential hat, wird der Begriff „CO₂-Äquivalent“ als Einheitsgröße zum Vergleichen der THGs verwendet (vgl. Zahoransky 2015, S. 574).

2.2. Ökobilanz und CO₂-Fußabdruck

Bereits 2007 gab es zahlreiche Definitionen für den CO₂-Fußabdruck (vgl. Wiedmann und Minx, S. 1). Aus diesem Grund soll der folgende Abschnitt den CO₂-Fußabdruck charakterisieren und von dem Begriff Ökobilanz abgrenzen.

2.2.1. Ökobilanz

Gemäß Wühle befasst sich die Ökobilanz, auf Englisch auch „Product Cycle Assessment“ (PCA) oder „Life Cycle Assessment“ (LCA) genannt, mit den gesamten Umwelteinwirkungen eines „Unternehmen, einer Kommune oder einer Organisation jeglicher Art“ (Wühle 2022, S. 151). Der PCA wurde ursprünglich zur Bewertung von Produkten ausgearbeitet, wird heute auch für Verfahren, Dienstleistungen und Verhaltensweisen angewendet. Im Optimalfall ist dabei der Kreislauf geschlossen (vgl. Wühle 2022, S. 151 f.). Ernst & Young ordnet die Themen rund um CO₂ dem Klimawandel zu während die Ökobilanz dem Umweltschutz zugeordnet wird (vgl. Englisch et al. 2012, S. 5).

Eine Norm zur Berechnung der Ökobilanz ist die DIN EN 14040. Sie betrachtet das Rohmaterial, sämtliche Transporte, die Produktion, die Lieferung, die Nutzung und schlussendlich die Wiederverwertung. Hierunter fallen alle In- und Outputs wie beispielsweise Energie, Vorprodukte, Flächennutzung, Abfälle, Nebenprodukte etc. (vgl. Wühle 2022, S. 152). Demnach werden neben den entstandenen Treibhausgasemissionen (THG) sämtliche weitere Umweltbelastungen wie der Abbau der Ozonschicht berücksichtigt.

2.2.2. CO₂-Fußabdruck

Der CO₂-Fußabdruck, auch Carbon Footprint genannt, bezieht sich hingegen ausschließlich auf THG-Emissionen, also auf eine Teilmenge der Ökobilanz, die direkt und indirekt von Produkten, Dienstleistungen oder Organisationen produziert werden. Unterschieden wird zwischen dem CO₂-Fußabdruck für Produkte, dem PCF, und dem CO₂-Fußabdruck für Unternehmen, dem „Corporate Carbon Footprint“ (CCF) (vgl. Wühle 2022, S. 155 ff.).

Der PCF, um den es in dieser Arbeit geht, berechnet die Bilanz der THG-Emissionen des gesamten Lebenszyklus eines Produktes (cradle to cradle). Dabei betrachtet der Produktlebenszyklus bei der Bewertung die gesamte Wertschöpfungskette von der Rohstoffgewinnung, dem Transport, der Produktion und Distribution, der (Nach-)Nutzung sowie der Entsorgung und Wiederverwertung. Der PCF eines Unternehmens oder einer Organisation berechnet sämtliche CO₂-Emissionen innerhalb der spezifischen Systemgrenzen des Unternehmens (vgl. Wühle 2022, S. 155 ff.). Beispiele zur Veranschaulichung verschiedener Bilanzrahmen sind in Abbildung 1, welche in einem späteren Kapitel erläutert wird, zu finden.

Im direkten Vergleich der Ökobilanz und spezifischer PCFs sind die PCFs, zumindest in Bezug auf die Software-Tools, für KMUs in der Regel kostengünstiger und weniger kompliziert in der Anwendung (vgl. Hottenroth et al. 2013, S. 21).

2.3. Treiber der benötigten PCF-Angaben

Im folgenden Abschnitt sollen die Treiber für die Notwendigkeit von PCFs ergründet und dargestellt werden.

Die ersten ausschlaggebenden Treiber sind Unternehmensgröße, Internationalisierung, geographische Lage, Position in der Lieferkette, Industriesektor sowie Managementwerte. Je größer und internationaler das Unternehmen, desto größer ist der Druck der Stakeholder auf das Unternehmen, klimafreundlich zu agieren (vgl. González-Benito und González-Benito 2010, S. 164). Doch wie in der Einleitung angeführt, neigen die großen Originalausrüstungshersteller („Original Equipment Manufacturer“, OEM) dazu, nur einen kleinen Wertschöpfungsanteil zu haben. Sie werden zukünftig ihre Zulieferer dazu drängen, klimaneutraler zu produzieren (vgl. Damert und Baumgartner 2018, S. 473 ff.), oder möglicherweise aussortieren (vgl. Buchenau et al. 2019).

Der Befund einer Untersuchung von Sprengel und Busch deutet ebenfalls auf ein breites Interesse hin, dass Unternehmen langfristig ihre CO₂-Fußabdrücke verringern wollen. Sie argumentieren in Ihrer Studie, dass verschiedene Akteure, darunter Regierungen, Investoren, Kunden, Nichtregierungsorganisationen, Lieferanten und Wettbewerber, die Unternehmen dazu drängen, ihre CO₂-Emissionen zu reduzieren (vgl. Sprengel und Busch 2011, S. 352 f.).

In der heutigen Zeit rückt nicht nur die Qualität der Produkte eines Unternehmens in den Fokus, sondern auch das Image der Marke spielt eine entscheidende Rolle für die Wettbewerbsfähigkeit. Aus diesem Grund streben Unternehmen verstärkt danach, ein nachhaltiges Image ihrer Marke oder ihres Unternehmens zu etablieren, was ein Treiber für die Notwendigkeit von PCFs ist (vgl. Lee 2012, S. 88). Auch Chuang und Huang kommen zu dem Ergebnis, dass nachhaltig agierende Unternehmen einen Wettbewerbsvorteil erzielen können (vgl. Chuang und Huang 2018, S. 1006).

Auch die Regierungen spielen eine maßgebliche Rolle als Treiber für die Entwicklung von PCFs. Jährlich werden neue Gesetze erlassen, Grenzwerte angepasst oder ähnliche Maßnahmen ergriffen. Ein Beispiel hierfür ist das Klimaschutzgesetz, welches nach der Klimakonferenz (COP21) in Paris im Jahr 2015 von 195 Ländern rechtsbindend unterzeichnet wurde. Dieses Gesetz legt in Paragraph vier konkrete Vorgaben zu den Emissionszielen fest. So soll beispielsweise die Industrie bis 2030 ihre jährlichen Emissionsmengen um etwa 36,55 % und bis 2040 um ganze 88 % im Vergleich zu 1990 reduzieren (vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2019, § 4; 2021, § 4).

Ein Mittel zur staatlichen Kontrolle der CO₂-Emissionen stellt der Europäische-Emissionshandel (EU-ETS) durch die Richtlinie „2003/87/EG“ dar (vgl. Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2003). Dieses im Jahr 2005 eingeführte Klimaschutzinstrument hat das Ziel, die THG-Emissionen der Energiewirtschaft und energieintensiven Industrien durch eine Obergrenze an Emissionsberechtigungen zu senken. Während einige Emissionsberechtigungen kostenlos vergeben werden, ist der Preis pro Tonne CO₂ seit 2008 von etwa 20 € auf über 100 € im Jahr 2023 angestiegen. Im Jahr 2022 entfiel etwa ein Drittel der insgesamt 354 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent in Deutschland auf die Industrie (vgl. Umweltbundesamt 2023).

Ein weiteres konkretes Beispiel für Regulierungen zum Erreichen der Klimaschutzziele stellt die „CO₂-Steuerung“ dar, welche durch das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) geregelt wird und 2021 eingeführt wurde. Diese Maßnahme zielt darauf ab, jede Tonne CO₂ zu bepreisen, die nicht bereits durch das EU-Emissionshandelssystem abgedeckt ist (vgl. Bundesministerium der Justiz 2019). Innerhalb von nur zwei Jahren nach seiner Einführung wurde das Gesetz bereits verschärft, wobei weitere Brennstoffe wie Kohle und Abfall einbezogen wurden (vgl. Deutscher Bundestag 2022).

Auch Katastrophen wie die Corona-Pandemie und der russische Krieg gegen die Ukraine haben indirekte Auswirkungen auf die Treiber für die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes. Der Krieg führte zu drastisch ansteigenden Energiepreisen für deutsche Unternehmen (vgl. Kagerl et al. 2022, 486 ff.). Kleinere CO₂-Fußabdrücke können dem entgegen wirken, wenn Energie zum Beispiel durch eigene Photovoltaikanlagen, gewonnen wird (vgl. Steimer und Arnold 2020, S. 302).

Neben einem positiven Image können die Einsparungen von CO₂ zu neuen Innovationen, einer erhöhten Kundenzufriedenheit und allgemeinen Kosteneinsparungen führen (vgl. Olatunji et al. 2019, S. 992 f.).

2.4. Anforderungen an KMUs der Metallbranche

Die Mehrheit der Unternehmen in Deutschland, bestehend aus Kleinstunternehmen (82,2 %), kleinen Unternehmen (14,7 %) und mittleren Unternehmen (2,5 %), sind KMUs, welche 99,3 % aller Unternehmen ausmachen (vgl. Statistisches Bundesamt 2021). Obwohl sie mit 30 % einen signifikanten Teil des Umsatzes in Deutschland erwirtschaften (vgl. Statista 2022), haben diese Unternehmen oft Schwierigkeiten, die erforderlichen Ressourcen und Kompetenzen für Maßnahmen zum Klimaschutz bereitzustellen. Insbesondere die Unklarheiten in Bezug auf Regularien stellen eine Herausforderung dar (vgl. Thiele und Zwick 2023, S. 103).

Abgesehen von einem Mangel an personellen und finanziellen Ressourcen, wurden laut einer Umfrage des DIHK ein erhöhter Aufwand für umfassende Treibhausgasbilanzierung, das Fehlen einheitlicher Standards und Labels zur Kommunikation eigener Erfolge, ein Mangel an Unterstützungsangeboten und Förderprogrammen für den Einstieg und die Umsetzung sowie Schwierigkeiten bei der Zugänglichkeit von Informationen und Transparenz als weitere Herausforderungen identifiziert (vgl. DIHK 2021, S. 13 f.).

Ein weiteres Problem für viele KMUs stellt das Angebotsnetzwerk dar. Auf der Angebotsseite stehen die fehlenden „grünen“ Lieferanten (vgl. Rizos et al. 2016, S. 14). Diese Problematik wird durch das Fehlen regionaler Lieferanten verstärkt, da in Deutschland keine Erze mehr abgebaut werden, aus denen sich Stahl, Metalle und Stahlveredler (Chrom, Kobalt, Mangan usw.) herstellen lassen. Diese Bedarfe werden hauptsächlich durch Importe gedeckt (vgl. Pilarsky 2014, S. 59 f.). Doch im fernen Ausland gestaltet sich die Auswahl nach geeigneten, nachhaltigen Lieferanten als schwierig und häufig gibt es nur wenige Alternativen.

Gemäß Rizos et al. ist die Unternehmenskultur und das Management entscheidend für eine erfolgreiche Implementierung. In ihrer Studie zeigen sie auf, dass die Denkweisen und Einstellungen des Personals unerlässlich für die Transformation zu einem umweltfreundlichen Unternehmen sind. Neu gegründete Start-up-Unternehmen haben dabei den Vorteil, diese Unternehmenskultur leichter zu entwickeln als bereits etablierte Unternehmen (vgl. Rizos et al. 2016, S. 14).

2.5. Standards und Normen zur Berechnung des PCFs

Im Bereich der Zertifizierung des PCFs sind mittlerweile zahlreiche Normen entwickelt worden. Zu den wichtigsten Normen zählen die ISO 14067, das GHG Protocol sowie das PAS 2050 (vgl. Lieback et al. 2020, S. 3 f.). Im folgenden Abschnitt werden diese Normen beschrieben und anschließend in einer Tabelle detailliert gegenübergestellt.

2.5.1. ISO 14040 und ISO 14044 zur Ökobilanz

Die ISO-Normen 14040 (vgl. Deutsches Institut für Normung 2006a) und ISO 14044 (vgl. Deutsches Institut für Normung 2006b) bilden die Grundlage für die nachfolgenden drei Normen. Die im Jahr 1997 veröffentlichte ISO 14040 wurde im Jahr 2006 überarbeitet und bezieht sich auf die in Kapitel 2.2.1 beschriebene Ökobilanz (Hottenroth et al. 2013, S.), „auf die Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen (z. B. Nutzung von Ressourcen und die Umweltauswirkungen von Emissionen) im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung (d. h. „von der Wiege bis zur Bahre“)“ (Deutsches Institut für Normung 2006a, S. 14).

2.5.2. Publicly Available Specifications (PAS) 2050

Das britische Standard PAS 2050 („Publicly Available Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services“) war der erste Ansatz der British Standards Institution (BSI), dem britischen Umweltministerium und Carbon Trust im Jahre 2008 (vgl. Hottenroth et al. 2013, S. 12; Guenther et al. 2012, S. 446 f.) und ist zusammen mit dem Handbuch kostenlos für die Öffentlichkeit zugänglich (vgl. BSI 2011a; 2011b, S. 1).

Die aktuelle Version (PAS 2050:2011) zielt darauf ab, die Methodik der Produktstandards für THG-Emissionen weiterzuentwickeln und Unternehmen dabei zu unterstützen, ihre Prozesse klimafreundlicher zu gestalten (vgl. Scrucca et al. 2021, S. 5). Basierend auf der ISO 14044 mit Schwerpunkt auf den Auswirkungen auf den Klimawandel hat das PAS 2050 einen Rahmen zur Quantifizierung von THG-Emissionen für Produkte entlang ihres Lebenszyklus entwickelt (vgl. Scrucca et al. 2021, S. 5; BSI 2011a; Lieback et al. 2020, S. 18).

Allerdings ist das aktuelle PAS 2050:2011 gemäß Hottenroth et al. nur eine Art Richtlinie/Empfehlung der Briten und aus diesem Grund nicht als „international harmonisierter, breit akzeptierter Standard“ anerkannt (Hottenroth et al. 2013, S. 13).

2.5.3. Greenhouse Gas Protocol von 2011

Im Jahr 2008 begann eine Multi-Stakeholder-Arbeitsgruppe, bestehend aus Unternehmen verschiedener Branchen, Nichtregierungsorganisationen und Regierungen unter der Leitung des World Resources Institute (WRI) und des World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), mit der Entwicklung des „Greenhouse Gas Protocol: Product life cycle accounting standard“. Nach mehrjähriger Entwicklung und globalen Praxisanwendungen wurde die Norm schließlich im Oktober 2011 publiziert (vgl. Lieback et al. 2020, S. 18; Hottenroth et al. 2013, S. 14; WRI und WBCSD 2011).

Diese Norm basiert größtenteils auf dem PAS 2050 und der ISO 14044. Das Ziel der kostenlosen Norm ist es, eine sorgfältige Anleitung zur Berechnung von produktbezogenen THG-Emissionen als international anerkannter Standard zur Verfügung zu stellen (vgl. Lieback et al. 2020, S. 18; Hottenroth et al. 2013, S. 14). Das GHG Protocol sieht unterdessen Berichtspflichten zur Festlegung von Reduktionszielen und zur Verfolgung von Bestandsänderungen vor (vgl. Liu et al. 2016, S. 71).

2.5.4. ISO 14067 (2018)

Neben den beschriebenen ISO Normen zur Ökobilanz ISO 14040 und ISO 14044 bilden die ISO 14020, ISO 14024 und ISO 14025 (Umweltkennzeichnungen und -deklarationen) die Grundlage für die ISO 14067 (vgl. Hottenroth et al. 2013, S. 14). Nach der Veröffentlichung im Jahr 2013 wurde die Norm im Jahr 2018 aktualisiert (vgl. Lieback et al. 2020, S. 18; Deutsches Institut für Normung 2018). Ziel der Norm ist es, das GHG Produktstandard und die PAS 2050 zu verbinden, um eine internationale Norm mit vielseitiger Anwendbarkeit zu erstellen (vgl. Hottenroth et al. 2013, S. 14).

Weitere wichtige Aspekte der technischen Spezifikation sind klare und eindeutige Quantifizierung und Kommunikation sowie die Vermeidung des „Greenwashings“, bei dem sich Unternehmen in der Öffentlichkeit ohne Grundlage als nachhaltig ausgeben (vgl. Scrucca et al. 2021, S. 6).

2.5.5. Vergleich der Normen

Obwohl alle drei Standards/Normen auf der ISO 14040 und 14044 basieren, weisen sie dennoch Differenzen in ihrer methodischen Vorgehensweise auf (vgl. Hottenroth et al. 2013, S. 14). Eine Gegenüberstellung dieser Unterschiede ist in Tabelle 1 dargestellt.

Standard/Norm	PAS2050	GHG Protocol	ISO 14067
Herausgeber	BSI British Standard Institution Co-Finanzierung: Defra (Department for Environment, Food and Rural Affairs) und Carbon Trust	WBCSD, WRI, GHG-Protocol-Initiative	International Organization for Standardization (ISO)
Zielstellung	Einführung einer einheitlichen Richtlinie zur THG-Bewertung eines Produkts/Dienstleistung	Standard für die Berechnung und Bilanzierung von Treibhausgasen	Standard zur Berechnung und Kommunikation von Treibhausgasen
Umfang	Bewertung	Bewertung	Bewertung und Kommunikation
Bewertungsgrundsätze	• Relevanz • Vollständigkeit • Genauigkeit • Transparenz	• Relevanz • Vollständigkeit • Genauigkeit • Transparenz • Konsistenz	• Relevanz • Vollständigkeit • Genauigkeit • Transparenz • Konsistenz • Kohärenz • Lebenswegbetrachtung • Priorität des wissenschaftlichen Ansatzes • Vermeidung von Doppelzählung • Iterativer Ansatz • Relativer Ansatz und funktionelle oder deklarierte Einheit
Berechnungsgrenze	• Cradle to gate • Cradle to grave	• Cradle to gate • Cradle to grave	• Cradle to gate • Cradle to grave

			• Gate to gate • Teilweiser CO₂-Fußabdruck
Ausschneidekriterien	Ausschluss aufgrund der Wesentlichkeit (<1 %); mindestens 95 % des gesamten Produktlebenszyklus müssen einbezogen werden; keine Scale-up-Anforderung zur Berücksichtigung von 100 %	Es gibt keine Ausschneidekriterien, da eine 100-prozentige Vollständigkeit erforderlich ist	Keine spezifischen Kriterien verfügbar
Recycling (Umgang)	Formal für die Berechnung von Wiederverwendungsschleifen	Korrekturfaktor, für das Downcycling von recycelten Produkten in offenen Kreisläufen	Anzahl der nachfolgenden Verwendungen eines Materials wird in Form eines Allokationsfaktors einbezogen
In Biomasse enthaltenes CO ₂ gespeichertes CO ₂	Innerhalb von 100 Jahren gespeichertes CO ₂ muss abgezogen werden	Nur bei Betrachtung der Produktionsphase, muss es abgezogen werden	Wenn gespeichertes CO ₂ berechnet wird, muss es separat ausgewiesen werden
Verzögerte THG	Einbezug mit Gewichtungsfaktor	Werden nicht berücksichtigt	Werden nicht berücksichtigt
Abschneidekriterien	Min. 95% des Lebenszyklus müssen berechnet werden	Keine Kriterien, da 100% Vollständigkeit gefordert wird	Unbedeutende Material- und Energieflüsse dürfen ausgeschlossen werden (Ausweispflicht für diese)
Kommunikationsanwendung für CO ₂ Labels	Verifikation durch Dritte, Angabe der berechneten CO ₂ Emissionen, der Reduktion von Emissionen oder Klimaneutralität	Verifikation durch Dritte, GHG Management Report, Reduktion Report und Performance Messung gegen interne und externe Benchmarks	Verifikation durch Dritte, Kommunikationsprogramm, Kategorie-Regeln, disclosure Report
Ausgeschlossene Emissionen	Transport des Personals zu dem Arbeitsplatz und Konsumenten zur Verkaufsstelle, menschliche Energie, die den Prozess hinzugefügt wird, Tiere als Transportmittel.		
Produktkategorieregel	Nicht enthalten		Enthalten
Treibhauspotenzial	100 Jahre		

Tabelle 1: Vergleich der Normen/Standards (Liu et al. 2016, S. 72; Lewandowski et al. 2021, S. 20; Wang et al. 2018, S. 4; Hottenroth et al. 2013, S. 92)

3. Leitfaden zur Erhebung eines PCFs

Im folgenden Kapitel wird ein Leitfaden zur Erhebung eines PCFs vorgestellt. Die Erstellung eines PCFs erfordert eine strukturierte Herangehensweise, um zuverlässige und vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Dieser Leitfaden gliedert sich in neun Schritte, beginnend mit der Zielfestlegung und endend mit der Auswahl des geeigneten Standards. Für jeden Schritt werden die wichtigsten Punkte zusammengefasst, um eine fundierte und transparente PCF-Berechnung zu begleiten.

3.1. Zielfestlegung

Es ist wichtig, klare Ziele für jede PCF-Erhebung festzulegen. Dadurch wird deutlich, welche Erwartungen mit der Erhebung verbunden sind und ob die gewählte Methode geeignet ist, diese Ziele zu erreichen. Zudem ermöglicht eine klare Zieldefinition die sorgfältige Planung und Umsetzung der nächsten Schritte sowie die Berücksichtigung von spezifischen Anforderungen des Unternehmens (vgl. Hottenroth et al. 2013, S. 22 ff.).

3.2. Produktauswahl

Zusätzlich zur Festlegung der Ziele ist die Auswahl des Produkts ein weiterer entscheidender Schritt bei der Vorbereitung einer PCF-Erhebung. Um ein passendes Produkt aus dem Sortiment des Unternehmens für die PCF-Erhebung auszuwählen, existieren verschiedene Auswahlkriterien. Diese sollten sich besonders an den zuvor festgesetzten Zielen orientieren, um sicherzustellen, dass das betrachtete Produkt dazu geeignet ist, die Erwartungen an die PCFs zu erfüllen. Insbesondere bei KMUs, die primär ein Standardprodukt herstellen, sollte dieses für die PCF-Erhebung gewählt werden. Falls mehrere Produkte zur Verfügung stehen, sollten bestimmte Faktoren berücksichtigt werden (vgl. Hottenroth et al. 2013, S. 24 f.):

- Datenverfügbarkeit
- Relevanz der THG-Emissionen im Vergleich zu anderen Umwelteinwirkungen
- Kooperationsbereitschaft von Lieferanten und Entsorgern
- Potenziale zur Reduktion der Emissionen
- (Strategische) Bedeutung der Produkte und Marktrelevanz eines PCFs
- Transparenz und Stabilität der Lieferketten
- Methodische Herausforderungen

3.3. Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit, auch für Zwischenprodukte zu beachten, fungiert als quantifizierte Darstellung des Nutzens eines Produktsystems, die als Vergleichseinheit verwendet wird. Ihre Festlegung sollte im Einklang mit den Zielen und dem Untersuchungsrahmen der Studie stehen, um eine Referenzgröße zu erstellen, auf die sich die Ausgangsströme des Produktsystems beziehen. In diesem Kontext sind der quantifizierte Nutzen des Systems, die Vergleichseinheit und die Bestimmung der funktionellen Einheit wichtig (vgl. Hottenroth et al. 2013, S. 25 ff.; Deutsches Institut für Normung 2018, S. 38 f.).

3.4. Das Produktsystem

Die Erstellung des PCFs sollte eine detaillierte Aufschlüsselung des Produktlebenszyklus umfassen. Typische Phasen können gemäß dem GHG Produktstandard die „Rohstoffgewinnung und Vorverarbeitung, Herstellung, Distribution und Lagerung, Nutzung sowie Entsorgung“ sein (Hottenroth et al. 2013, S. 28 ff.). Andere Phasen des Lebenszyklus können jedoch durch Umbenennung, Zusammenführung oder Trennung angepasst werden. Wichtig für die Definition ist die schlüssige Festlegung der Grenzen (vgl. Hottenroth et al. 2013, S. 28 ff.).

Wie in Abbildung 1 dargestellt, gibt es verschiedene Betrachtungsräume für die CO₂-Fußabdruck-Analyse. In der Regel erstreckt sich der übliche Betrachtungshorizont von der Rohstoffgewinnung zum Warenausgang (cradle to gate). Weitere Ansätze umfassen den Zeitraum vom Wareneingang bis zum Warenausgang (gate to gate) sowie die umfassendere „cradle to grave“-Perspektive. Letztere erfasst den gesamten Lebenszyklus des Produkts bis zur endgültigen Entsorgung und wird möglicherweise zukünftig gefordert, erscheint gegenwärtig, insbesondere im Rahmen dieser Hausarbeit, als zu komplex.

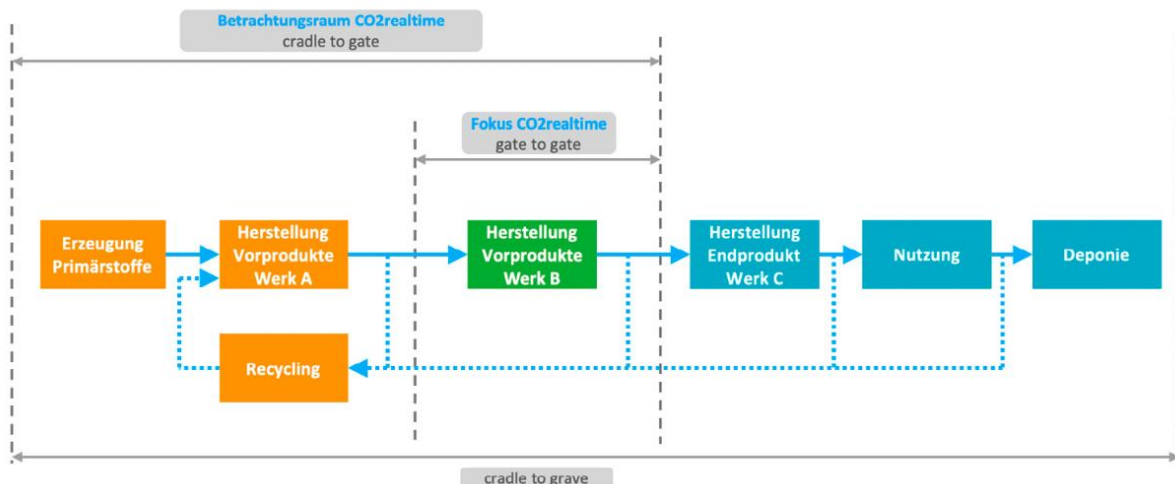


Abbildung 1: Bilanzrahmen und Systematische Allokation von THG-Emissionen (ÖKOTEC Energiemanagement GmbH 2020, S. 45)

3.5. Systemgrenzen

Bestehend aus der Ökosphäre und einem unberücksichtigten Teil der Technosphäre, trennt die Systemgrenze das Produktsystem von seiner Umgebung. Inputs fließen über diese Grenze in das System, während Outputs herausfließen. Die Systemgrenze legt fest, welche Prozesse sowie Ein- und Ausgänge in die Berechnung einbezogen werden. Die Abschneidekriterien definieren den Einbezug in das Produktsystem. Zusätzlich ist die Systemgrenze von entscheidender Bedeutung, da sie das betrachtete Produktsystem von anderen Teilsystemen abgrenzt, um eine aussagekräftige Analyse zu ermöglichen. Ohne diese Abgrenzung würden die Systeme zu groß und komplex für eine sinnvolle Bewertung werden. Daher müssen weniger wichtige Verbindungen zu anderen Systemen durchtrennt werden, um irrelevante Prozesse auszuschließen. Die technologische, geografische und zeitliche Systemgrenze muss beachtet und dokumentiert werden (vgl. Deutsches Institut für Normung 2018, S. 39 ff.; Hottenroth et al. 2013, S. 31 f.).

3.6. Fließbild

Für eine klare und präzise Darstellung ist empfohlen, das betrachtete Produktsystem durch ein grafisches Systemfließbild zu visualisieren. Dabei werden alle Prozessmodule des Produktlebenszyklus des Produkts als Kästen dargestellt. Das Systemfließbild sollte mindestens die Lebenswegphasen, die einzelnen Prozessmodule, den Produktweg, die Systemgrenzen, ausgeschlossene Prozesse sowie inner- und außerbetriebliche Prozesse enthalten (vgl. Hottenroth et al. 2013, S. 36 f.).

3.7. Nebenprodukte, Recycling und Ausschuss

Nebenprodukte und Ausschuss sind übliche Bestandteile vieler Produktionsprozesse. Es ist wichtig, dass sie vollständig in die Bilanzierung des Produkts einfließen (vgl. Hottenroth et al. 2013, S. 30; Deutsches Institut für Normung 2018, S. 50 ff.). Sofern sie nicht direkt zuzuordnen sind, muss ein Allokationsverfahren angewandt werden (vgl. Deutsches Institut für Normung 2018, S. 50 ff.). In diesem Zusammenhang kann Recycling eine wertvolle Maßnahme zur Minimierung des PCF sein.

Bei bestimmten zerspanenden Produkten können Nebenprodukte, wie in der Zuliefererbranche für die Flugzeugindustrie, große Anteile ausmachen. Gemäß Das et al. können durch das Recycling von Aluminium, das in dieser Branche verwendet wird, bis zu 95 % Energie und Emissionen eingespart werden. Im Detail geben sie an, dass die Produktion von primärem Aluminium durch den Stromverbrauch und den Transport etwa 12 kg CO₂ pro Kilogramm Metall erzeugt. Im Gegensatz dazu würde die Herstellung eines Kilogramms Metall durch Recycling nur etwa 0,6 kg CO₂ verursachen (vgl. Das et al. 2010, S. 1). Diese Anwendbarkeit des Recyclings kann auf viele verschiedene Materialien der Nebenprodukte angewendet werden.

3.8. Umgang mit fehlenden und fraglichen Daten

Fehlende Primär- und Sekundärdaten resultieren in Datenlücken bei der Berechnung des PCFs. In solchen Fällen müssen Ersatzdatenbanken, Schätzungen und Vergleichsrechnungen herangezogen werden. Zum Beispiel können, unter der Annahme ähnlicher Herstellungsprozesse, Daten eines anderen Düngemittels verwendet werden, wenn Informationen über ein bestimmtes Düngemittel fehlen (vgl. Hottenroth et al. 2013, S. 44).

Die Bewertung der Datenlage von vorgelagerten Prozessen in der Lieferkette gestaltet sich oft schwierig, da häufig unklar ist, wie die Daten vom Lieferanten erhoben wurden. Dies ist besonders für Vorprodukte wichtig, die einen bedeutenden Anteil an den THG-Emissionen der Lieferkette haben. Idealerweise haben Lieferanten bereits ein PCF für das Produkt erstellt, andernfalls müssen die Daten geschätzt oder errechnet werden (vgl. Hottenroth et al. 2013, S. 44).

3.9. Auswahl der geeigneten Norm

Die vorliegende Hausarbeit wird sich auf die ISO 14067 als Leitfaden für die Ausarbeitung des PCFs konzentrieren, weil sich die Norm international etabliert hat. Die Anwendung der ISO 14067 bietet umfangreiche Richtlinien für die Berechnung, Bewertung und Kommunikation des CO₂-Fußabdrucks von Produkten. Aufgrund seiner weitreichenden Akzeptanz und Verwendung ist die ISO 14067 eine verlässliche Grundlage für die Erstellung von PCF-Berichten.

4. Tool-Entwicklung

Im folgenden Kapitel wird das entwickelte Excel-Tool zur Berechnung des PCFs hinsichtlich der Funktionalität umfangreich beschrieben. Das Excel-Tool besteht aus insgesamt fünf verschiedenen Arbeitsblättern, welche im Rahmen dieses Kapitels detailliert aufgeführt werden:

- Anwendung
- CO₂-Faktoren für EGT
- Alph. Aufstellung der Res.
- Pivot
- Stofffluss

4.1. Anwendung

Die Anwendung kann als der wichtigste Teil des Tools für die Benutzung beschrieben werden. Wie eine Eingabe beispielhaft aussehen kann, zeigt die Abbildung 2. Hier sind vier unterschiedliche Formen zu sehen, die bestimmte „Macros“ ausführen, sowie ein Filter und eine Tabelle, in welche die Daten zur Berechnung eingegeben werden.

Oberkategorie
einfügen

Unterkategorie
einfügen

Berechnen,
aktualisieren

Dashboard

Filter der Unterkategorien

Demonstrationstit...
Demonstrationstit...

Prozess	Ressource	Menge / Verbrauch	Einheit	Emissionsfaktor ("Einheit" CO ₂ e pro Einheit)	"Einheit"	Treibhausgasemission (CO ₂ e in kg)	Oberkategorie Summe	Anteile	Quelle
Demonstrationstitel 1							0,596	0,66667	
Beispielhafte Beschreibung 1	Acetylen	0,2	kg	2,98	kgCO ₂ /kg	0,5960000000		0,66667	
Demonstrationstitel 2							0,298	0,33333	
Beispielhafte Beschreibung 2	Acetylen	0,1	kg	2,98	kgCO ₂ /kg	0,2980000000		0,33333	
Gesamt						0,894			

Abbildung 2: Excel-Tool – Anwendung (eigene Darstellung)

Das Grundgerüst der Tabelle umfasst zehn verschiedene Spalten. In Spalte A werden Einträge für die genaue Zuordnung zu dem Prozess vorgenommen, wobei zwischen Oberkategorien (blauer Hintergrund) und Unterkategorien (weißer Hintergrund) unterschieden wird. In der nächsten Spalte wird die Ressource klassifiziert, welche in den Datenbanken einen Wert für den Emissionsfaktor zugeordnet bekommen hat. Diese sind als CO₂-Äquivalent pro Einheit in der Spalte E eingetragen. Daher ist es essenziell, dass die Einheiten in Spalten C, D und G übereinstimmen, wenn das Excel-Tool verwendet wird.

Wenn der ausgewählte Energieträger wie in diesem Beispiel „kgCO₂/kg“ ist, muss die Einheit der Spalte D dieselbe sein. Das bedeutet für dieses Beispiel, dass der Wert für die Menge / den Verbrauch der Spalte C dieselbe Einheit haben muss wie die Spalte F. Es muss also „kg“ sein. Wenn sich bei der innerbetrieblichen Verbrauchsermittlung beispielsweise die Einheit Liter („l“) für den Anwendungsfall ergibt, muss der Verbrauch in Kilogramm umgerechnet werden, zum Beispiel über die Dichte.

Spalte G ergibt sich durch die Multiplikation der Menge / des Verbrauchs mit dem Emissionsfaktor des zugewiesenen Energieträgers. Die Werte in Spalte G werden am Ende der Tabelle in der Zeile „Gesamt“ summiert. Somit dient Spalte G als Berechnungsgrundlage für die nächsten beiden Spalten: Spalte H, die die Summe der Oberkategorien darstellt, und Spalte I, die die Anteile der einzelnen Zeilen, sowohl der Ober- als auch der Unterkategorien, angibt. Die letzte Spalte (J) gibt die Quelle an, die dem Energieträger die Werte des Emissionsfaktors zuweist.

Das blaue Rechteck mit dem Text „Oberkategorie einfügen“ fügt die Beschriftung, beziehungsweise die Oberkategorie in Spalte A ein. Dabei wird die neuste Zeile immer in hellblau am Ende der Tabelle eingefügt, also über die Zeile mit „Gesamt“. Das Pop-up-Fenster ist in Abbildung 3 dargestellt.

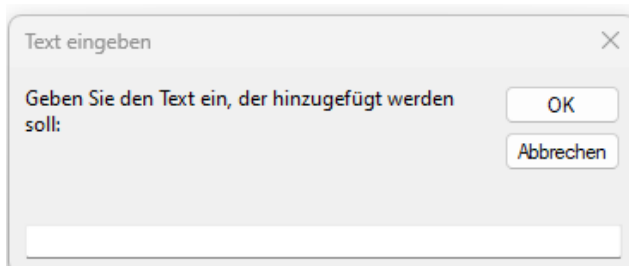


Abbildung 3: Excel-Tool – Oberkategorie einfügen (eigene Darstellung)

Abbildung 4 zeigt ein Popup-Fenster, das erscheint, wenn das gelbe Rechteck mit der Beschriftung „Unterkategorie einfügen“ angeklickt wird. Der Prozess zur Auswahl der Unterkategorie ist nummeriert. Zuerst wird ausgewählt, ob es sich um einen Rohstoff (z. B. Aluminium) oder eine Energiequelle (z. B. Strom) handelt. Abhängig von dieser Auswahl erscheinen die Werte der Datenbanken im nächsten Schritt in Form einer Dropdown-Liste. Hier muss die Ressource, für die die Werte der Oberkategorie zugeordnet werden sollen, ausgewählt werden. Falls die gesuchte Ressource nicht in der Liste enthalten ist, muss sie dem jeweiligen Arbeitsblatt hinzugefügt werden, wie in den Abschnitten 4.3 und 4.4 genauer beschrieben wird.

The screenshot shows a software window titled 'UserForm1'. On the left, there is a graphic with green dots and lines. The main area contains four numbered steps for data entry:

- 1. Ressource auswählen**: Two radio buttons labeled 'Rohstoff' and 'Energieressource'.
- 2. Ressource auswählen**: A dropdown menu with the placeholder text '2. Bitte Ressource auswählen.'.
- 3. Oberkategorie auswählen**: A dropdown menu with the placeholder text '3. Bitte Oberkategorie auswählen'.
- 4. Beschreibung eingeben**: A text input field.

At the bottom left is the 'MANUFACTURING INNOVATIONS NETWORK' logo. At the bottom right is a floppy disk icon representing a save function.

Abbildung 4: Excel Tool: Unterkategorie einfügen (eigene Darstellung)

Nachdem die Energieressource ausgewählt wurde, folgt Schritt drei, die Auswahl der Oberkategorie. Durch diese Selektion werden die eingetragenen Daten der zugeordneten Oberkategorie in einer neuen Zeile mit weißem Hintergrund eingefügt. Schritt vier beinhaltet das Eingeben der Beschreibung in die Spalte A, welche jederzeit geändert werden kann. Die Eingabe wird durch das Speicher-Symbol in der unteren rechten Ecke bestätigt.

Die einzigen Felder, die bei der Verwendung des Tools in der Tabelle bearbeiten muss, sind Spalte C, die den Verbrauch oder die gemessene Menge widerspiegelt, sowie bei abweichender Einheit Spalte D. In den Zellen der Spalte D, sind die Einheiten (kg, l, kWh, etc.) in Form eines Drop-Down-Menüs hinterlegt. Sofern die Daten selbst gemessen wurden, können sie an jeder Stelle der Tabelle angepasst werden (Einheit und/oder CO₂-Faktor).

Das grüne Rechteck führt in der Arbeitsmappe den Befehl aus, sämtliche Berechnungen durchzuführen und aktualisiert außerdem die Pivot-Tabellen und Diagramme. Bevor der Button das erste Mal aktiviert wurde, sind die Spalten H und I sowie die Summe der Zeile „Gesamt“ in Spalte G leer.

Für den Vergleichsprozess sind die Spalten K bis N mit derselben Logik wie die Spalten B bis J aufgebaut. Markiert sind die Tabellentitel durch die Ergänzung „V.“ für „Vergleich“. Dies dient einem direkten Vergleich, um zu überprüfen, welche Maßnahmen während der Produktion ergriffen werden können, um den PCF zu verringern.

Die Vergleichswerte werden vorerst mit dem Prozess von „Unterkategorie einfügen“ generiert und entsprechen im ersten Schritt den Werten des „echten“ Prozesses. Sie lassen sich anschließend in Spalte K bis N anpassen. Im Detail die Ressource, die Menge/Verbrauch, die Einheit und/oder der Emissionsfaktor. Für die „V: Ressource“ steht in den Zellen der Spalte K, basierend auf der zuvor getroffenen Wahl, eine Auswahl der Datenbanken „CO₂-Faktoren für EGT“ bzw. „Alph. Aufstellung der Res.“, in Form eines Dropdown-Menüs zur Verfügung. Bei Änderung der Ressource passen sich durch eine Formel die Werte automatisch an, können jedoch im Nachhinein überschrieben werden.

Zur Visualisierung der eingefügten Daten kann über das lilafarbige Rechteck ein Dashboard aufgerufen werden. Ein Ausschnitt von dem Dashboard ist in Abbildung 5 dargestellt. Dieses enthält vier Kreis- und zwei Balkendiagramme. Die Kreisdiagramme stellen die Unter- und Oberkategorien des „echten“ Prozesses und des Vergleichsprozesses gegenüber. Die Balkendiagramme visualisieren die Differenzen zwischen den beiden Prozessen sowohl für die Unter- als auch für die Oberkategorie.

Das Dashboard wurde als „nicht modal“ programmiert, was bedeutet, dass die Werte in der Excel-Tabelle auch bei geöffnetem Dashboard angepasst werden können. Nach der Anpassung der Werte müssen jedoch die Ergebnisse, Pivot-Tabellen und Diagramme aktualisiert werden. Dies geschieht für die Arbeitsmappe über den „Berechnen, aktualisieren“-Knopf und für das Dashboard über den „Aktualisieren“-Knopf. Zusätzlich gibt es oben rechts in Abbildung 2 den „Filter der Unterkategorien“.

Hier kann für das Dashboard (vierter Knopf) eine Filterung vorgenommen werden, um die Unterkategorien in einem Diagramm detailliert und gegenübergestellt zu betrachten. Erneut müssen die Diagramme manuell aktualisiert werden.

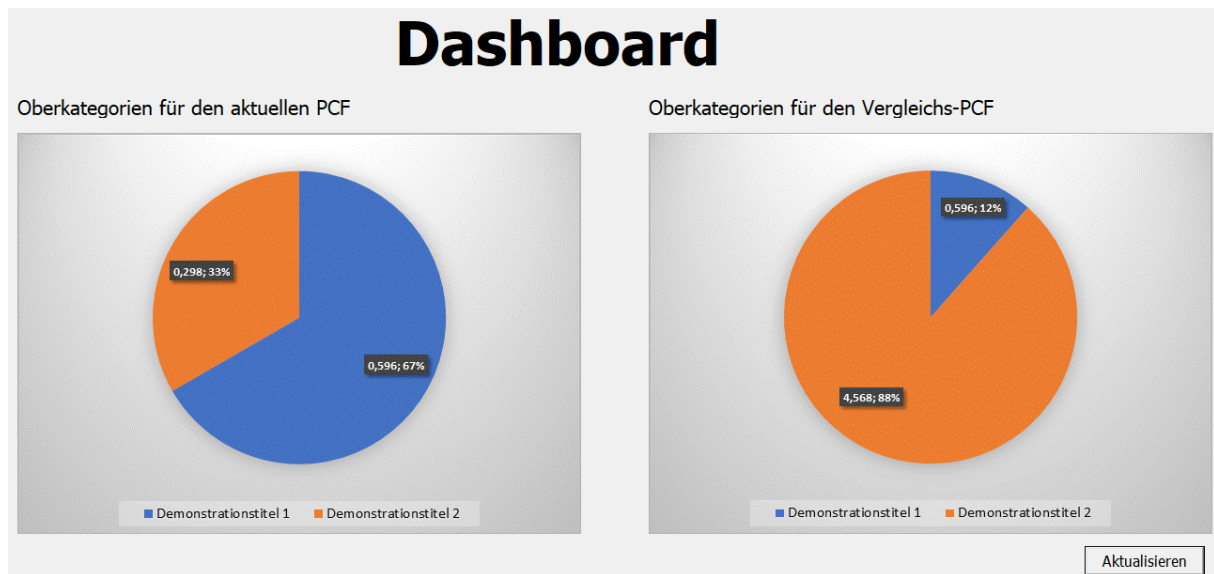


Abbildung 5: Excel-Tool – Dashboard (eigene Darstellung)

4.2. Datengrundlage

Im folgenden Abschnitt wird die Datengrundlage für die Datenbank erläutert.

Für die Daten dieses Abschnitts 4.1 und 4.2 – den Arbeitsblättern „CO₂-Faktoren für EGT“ sowie „Alph. Aufstellung der Res.“ werden überwiegend die Daten des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle verwendet. Sie stammen aus der Versionsnummer 7 vom 15.02.2024 (vgl. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2024, S. 2). Diese Daten werden regelmäßig aktualisiert und durch eine neue Liste mit einer höheren Versionsnummer ersetzt. Wenn das Excel-Tool Jahre nach dem Erstellungsdatum verwendet wird, müssen die Daten auf den neuesten Stand gebracht werden, um eine korrekte Einschätzung der Ergebnisse zu gewährleisten. Folgende Grundlagen liegen den Berechnungen der CO₂-Faktoren zugrunde:

- „Cradle-to-gate-Ansatz der Lebenszykluskostenanalyse (Life-Cycle-Assessment, LCA)
- Einbezogene Treibhausgase (THG): Alle Kyoto Gase (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆, NF₃) sowie VOC (volatile organic compounds), insofern sie einen relevanten Anteil ausmachen
- Das Global-Warming-Potential (GWP) bezogen auf 100 Jahre; entsprechend den Vorgaben des Intergovernmental panel on Climate Change (IPCC) zu ermitteln
- Cut-Off-Methode zur Erstellung von Ökobilanz für Produkt“ (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2024, S. 10)

4.3. CO₂-Faktoren für Energieträger (EGT)

Dieser Abschnitt beschreibt das Arbeitsblatt „CO₂-Faktoren für EGT“. Abbildung 6 zeigt einen Ausschnitt aus diesem Arbeitsblatt. Es enthält eine Tabelle mit fünf Spalten. In der ersten Spalte sind die Energieträger alphabetisch angeordnet, gefolgt von der vorgegebenen Einheit des Energieträgers in Spalte B. In Spalte C befindet sich der CO₂-Faktor, der zusammen mit der Einheit einen Teil des CO₂-Fußabdrucks ausmacht. Wenn die Quelle (Spalte D) nicht die Standardquelle des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (vgl. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2024) ist, wird in den Zellen der Spalte D auf die Quelle verwiesen. Die Daten dieser Quelle umfassen alle direkten Emissionen sowie die Emissionen der erforderlichen vorgelagerten Lieferketten (vgl. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2024, S. 8). Die Spalte E ist für Anmerkungen vorgesehen und erscheint ausschließlich in diesem Arbeitsblatt. Einige Anmerkungen sind bereits in der Abbildung zu sehen.

In Abschnitt 4.1 wurde im Zusammenhang mit „Unterkategorie einfügen“ das Fehlen von Daten thematisiert. Wenn der gewünschte Energieträger nicht in der Dropdown-Liste „2. Ressource auswählen“ des Popup-Fensters vom Knopf „Unterkategorie einfügen“ vorhanden ist, so wird er in dieser Liste fehlen. In diesem Fall müssen die Daten für den Energieträger manuell eingetragen werden. Das Hinzufügen funktioniert (idealerweise alphabetisch) durch das Markieren einer Zeile mit der Tastenkombination „Strg + „+““. Beginnend mit dem Energieträger muss die korrekte Einheit für den errechneten Wert eingefügt werden.

Beispiele zu diesem Vorgehen werden in Kapitel 5 verdeutlicht. Sofern die Quelle eigenen Berechnungen entspricht, sollte in Spalte D „eigene Berechnung“ vermerkt werden, andernfalls die Quellenangabe.

Energieträger	Einheit	CO ₂ -Faktor	Quelle, sofern abweichend	Anmerkung
Altöl	kgCO ₂ /kWh	0,288		
Biodiesel	kgCO ₂ /kWh	0,07		Nur bei Erzeugung auf dem Betriebsgelände
Bioethanol	kgCO ₂ /kWh	0,043		Abschnitt „Definition von Wasserstoff (Erneuerbare Quelle) beachten
Biogas	kgCO ₂ /kWh	0,152		Abschnitt „Definition von Wasserstoff (Erneuerbare Quelle) beachten
Braunkohle	kgCO ₂ /kWh	0,383		

Abbildung 6: Excel-Tool – Ausschnitt CO₂-Faktoren für EGT (eigene Darstellung)

4.4. Alph. Aufstellung der Res.

Die Alphabetische Aufstellung der Ressourcen („Alph. Aufstellung der Res.“ – Tabelle 5 der Quelle) folgt demselben Aufbau wie die CO₂-Faktoren für Energieträger, welche in Abbildung 6 aus Abschnitt 4.3 und wird daher nicht weiter erläutert. Die Trennung der Tabellen durch zwei verschiedene Arbeitsblätter ist durch die Trennung in Tabelle 2 und Tabelle 5 der Primärquelle begründet. So soll die Aktualisierung der Daten bei neuen Versionen erleichtert werden.

4.5. Pivot

In dem Arbeitsblatt „Pivot“ werden die Daten der Tabelle des Arbeitsblattes „Anwendung“ in Pivot-Tabellen erfasst. Dies ermöglicht eine dynamische Visualisierung der Daten in Diagrammen. Für das Dashboard muss jedoch der Zwischenschritt über das Aktualisieren in der Anwendung und dem Dashboard erfolgen. Dies liegt daran, dass die Diagramme aus der Excel-Mappe exportiert und dann in das Dashboard importiert werden. Die Anzeige des Dashboards ist aus diesem Grund mit Bildern visualisiert.

5. Tool-Anwendung am Beispiel eines Bolzens

Im folgenden Kapitel wird der gesamte Prozess zur Bestimmung eines PCFs sowie die Anwendung des Excel-Tools am Beispiel eines Bolzens verdeutlicht. Dazu werden die einzelnen Abschnitte des Leitfadens aus Kapitel 3 auf ein selbst gewähltes Beispielprodukt angewendet und anschließend mithilfe des Excel-Tools berechnet und analysiert.

5.1. Zielfestlegung

Das Ziel der PCF-Berechnung ist es, anhand eines konkreten Beispiels die Anwendung des Excel-Tools sowie die Schritte aus den vorherigen Kapiteln 3 und 4 zu veranschaulichen. Indem der Leitfaden auf ein ausgewähltes Produkt angewendet und die Daten in das Excel-Tool integriert werden, soll gezeigt werden, wie ein PCF ermittelt werden kann.

5.2. Produktauswahl

Die Wahl fiel auf einen Bolzen als Demonstrationsprodukt für die PCF-Berechnung, da der Ersteller der Hausarbeit enge Kontakte zu erfahrenen Zerspanungsmechanikern hat. Diese Experten verfügen über langjährige Berufserfahrung in der Herstellung von Bolzen, welcher sich durch seinen simplen Aufbau und Herstellungsprozess auszeichnet, was ihn ideal für diesen Demonstrationszweck macht.

5.3. Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit des Bolzens zur Berechnung des PCF liegt bei „einem Stück Bolzen“, beziehungsweise 200 g (Gewicht eines einzelnen Bolzens). Die Maße des Bolzens betragen 28 mm im Durchmesser und 120 mm in der Länge.

5.4. Das Produktsystem

Mit Blick auf Abbildung 1 wird der PCF für den cradle to gate Ansatz berechnet. Die Daten der Datenbanken vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle betrachten bereits die vorgelagerten Lieferketten und Produktionsschritte in Bezug auf die Emissionen. Die eigenen Prozesse werden hingegen mithilfe der Zerspanungsmechaniker beispielhaft berechnet und mit hergeleiteten Werten aus der Fachliteratur ergänzt.

Für den Bolzen werden die Rohstoffgewinnung sowie Vorverarbeitung bereits über die Emissionsfaktoren der Datenbanken im System erfasst. Der primäre Fokus liegt auf der Herstellung und zum Teil in der Distribution. Alle nachgelagerten Prozesse wie Nutzung und Entsorgung werden nicht betrachtet.

5.5. Systemgrenzen

Die Systemgrenzen beziehen sich auf Abschneidekriterien, technologische und geografische sowie zeitliche Systemgrenzen des Bilanzzeitraums. In der Regel können unter bestimmten Standards (siehe Tabelle 1) gewisse Prozesse, abgeschnitten werden, wenn ihr Beitrag zum PCF marginal ist. Im Fall des Bolzens wird versucht, alle relevanten Kriterien zu berücksichtigen. Aufgrund der hohen Stückzahl und der geringen Bearbeitungsfläche wird der Verschleiß des Werkzeugs in diesem Fall vernachlässigt. Obwohl der Stromverbrauch für die Druckluft einbezogen wird, fällt dieser Anteil ebenfalls gering aus.

Die technischen Systemgrenzen werden hauptsächlich durch die Biglia Zerspanungsmaschine und den Galvanisierungsprozess definiert. Aufgrund von Datenschutzgründen werden hier keine spezifischen Angaben gemacht. Die geografische Systemgrenze wird durch Deutschland bestimmt, insbesondere in Bezug auf den Strommix. Da das Beispiel der PCF-Berechnung für den Bolzen auf dem cradle to gate Ansatz beruht, spielt die zeitliche Systemgrenze eine untergeordnete Rolle, weil der gesamte Produktlebenszyklus nicht mehr ins Gewicht fällt. Ausschließlich für den Strommix ist die zeitliche Systemgrenze relevant, weil dieser stark variieren kann. Der Wert für den Strommix wurde am 22.04.2024 erfasst.

5.6. Stoffflussanalyse

Im folgenden Abschnitt soll der Prozess des Bolzens erläutert werden. Dazu wird eine Prozessübersicht mit einem Fließbild dargestellt, welches die einzelnen Bearbeitungsschritte veranschaulicht. Anschließend erfolgt eine exemplarische Berechnung für den Prozess, um die Daten für das Excel-Tool zu ermitteln.

5.6.1. Prozessübersicht

Die Abbildung 7 visualisiert eine Stoffflussanalyse, um den Prozess der Bolzenherstellung zu erläutern.

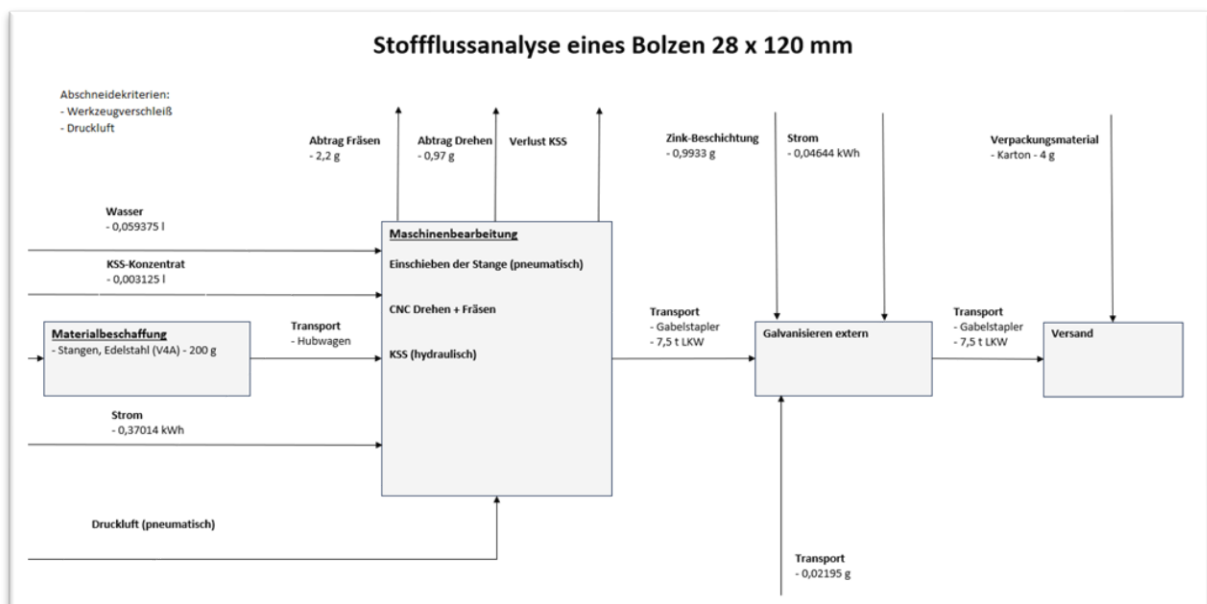


Abbildung 7: Stoffflussanalyse der Bolzenherstellung (eigene Darstellung)

Der Herstellungsprozess für die Bolzen beginnt mit dem Einkauf von 3 m langen Stangen aus Edelstahl (V4A). Diese Stangen werden just-in-time geliefert und in die Nähe des Eingangstors der Halle transportiert, in der sich die Biglia Zerspanungsmaschine befindet. Dort werden sie mit einem Hubwagen vor die Anlage transportiert und entladen. Anschließend werden die Stangen in den pneumatischen Stangenlader gegeben, der das Material automatisch für die Bearbeitung durch die Maschine bereitstellt.

Der Bearbeitungsprozess der Biglia besteht neben der Beladung mit kurzem pneumatischem Aufwand (Strom- und Druckluftverbrauch) aus einem Dreh- und einem Fräsprozess. Während der gesamten Bearbeitungszeit wird durch eine hydraulische Vorrichtung ein Kühlschmiermittel verwendet, das eine Mischung aus Wasser und Kühlschmierstoffkonzentrat ist.

Nach dem Bearbeitungsprozesses in der Biglia, werden mehrere Lose Bolzen zusammen mit anderen Materialien mit dem Gabelstapler auf den LKW verladen und anschließend zum externen Dienstleister für die Galvanisierung transportiert. Nach dem die Galvanisierung der Bolzen durchgeführt wurde, wird der Bolzen im selben Prinzip zurück transportiert und geht dann in den Versand für Warenausgang, wo die Bolzen in verschiedenen Losgrößen in einem stabilen Karton verpackt werden.

5.6.2. Datenermittlung für die Bolzenherstellung

Im Folgenden sollen die Werte für das Excel-Tool ermittelt werden. Die Daten können im Excel-Tool als Ober- und Unterkategorie eingefügt werden. Die Berechnung wird entsprechend ihren Oberkategorien aufgeteilt, und die einzelnen Unterkategorien werden ermittelt. Für die Herstellung eines Bolzens wird Rohmaterial verwendet, das aus 200 g Edelstahl (V4A) mit einem Durchmesser von 28 mm und einer Länge von 120 mm besteht. Der Hersteller stellt insgesamt 100.000 Bolzen pro Jahr her. Die Anlage verbraucht dabei 1.000 l Kühlschmierstoff pro Jahr und benötigt insgesamt etwa 3 Minuten Bearbeitungszeit pro Bolzen. Außerdem wird mit 250 Arbeitstagen pro Jahr gerechnet.

5.6.2.1. Materialbeschaffung

Der Bolzen wird wie bereits beschrieben aus Edelstahl hergestellt, wobei ein Bolzen in der Rohform 200 g wiegt. Nun muss klar definiert werden, wie der Umgang mit dem Ausschuss ist, um die korrekte Menge zu ermitteln. Beim Drehen und Fräsen entsteht laut Angaben des Zerspanungsmechanikers insgesamt ein Abtrag von 3,17 g.

Um sicherzustellen, dass diese Werte den richtigen Prozessen zugeordnet werden und nicht doppelt berechnet werden, werden sie in diesem Beispiel vom Materialbeschaffungsprozess abgezogen. Somit gehen effektiv 196,83 g Edelstahl in den Beschaffungsprozess ein. Denkbar wäre es ebenfalls, die 200 g in der Beschaffung, dafür aber keinen Abtrag zu berechnen oder im Falle von Recycling „Gutschriften“ einzutragen.

5.6.2.2. Maschinenbearbeitung

Während der Maschinenbearbeitung entsteht durch die Bearbeitungsprozesse ein Abtrag. Für das Drehen sind es 2,2 g und für das Fräsen 0,97 g, jeweils aus Edelstahl. Gemäß Peng et al. verbraucht eine Drehmaschine mit einem 23 kW Motor 178,1 kWh in 24 Stunden (vgl. Peng et al. 2014, S. 204).

Dieser Wert entspricht exakt dem Wert der Biglia. Bei Umrechnung der Leistung auf die Biglia und Anwendung auf drei Minuten Bearbeitungszeit ergibt sich ein Energieverbrauch von 0,37104 kWh (vgl. Electricity Maps ApS o. J.).

$$\text{Verbrauch in kWh: } \frac{178,1 \text{ kWh}}{24 \text{ h} * 60 \text{ min}} * 3 \text{ min} = 0,37104 \text{ kWh}$$

Der Tank für den Kühlschmierstoff der Biglia hat ein Volumen von 1.000 l, wobei das Mischverhältnis 90 % Wasser zu 10 % Kühlschmierstoffkonzentrat beträgt. Zusätzlich müssen alle zwei Tage 50 l mit einer Rückführungsrate von 5 % Kühlschmierstoffkonzentrat nachgefüllt werden. Mit diesen Angaben lässt sich der Wasserverbrauch und der Bedarf an Kühlschmierstoffkonzentrat wie folgt berechnen:

$$\text{Wasserverbrauch: } \frac{1.000 \text{ l} * 0,9 + 50 \text{ l} * \frac{250 \text{ Tage}}{2 \text{ Tage}} * 0,95}{100.000 \text{ Bolzen}} = 0,059375 \text{ l pro Bolzen}$$

Der Wasserbrauch kann bei der Ressource „Wasser“ mit 0,059375 l in das Excel-Tool eingegeben werden. Obwohl die Einheit in der Datenbank Kilogramm ist, kann sie durch die Dichte des Wassers gleichgesetzt werden.

$$\text{KSS – Konzentrat: } \frac{1.000 \text{ l} * 0,1 + 50 \text{ l} * \frac{250 \text{ Tage}}{2 \text{ Tage}} * 0,05}{100.000 \text{ Bolzen}} = 0,003125 \text{ l pro Bolzen}$$

Auch das Kühlschmierstoffkonzentrat hat eine Dichte von ca. 1 g/cm³ und kann gleich Liter gesetzt werden. Es werden 0,003125 kg Kühlschmierstoffkonzentrat zur Herstellung benötigt. Der CO₂-Faktor für das Konzentrat war nicht in der Datenbank verfügbar und wurde mit 3,7 kg/CO₂e ergänzt (vgl. Schlütersche Fachmedien GmbH, 2023).

Nach der Fertigstellung des Bolzens fällt noch ein Transport an. Dieser umfasst die Strecke von der Maschine bis zum Warenausgang sowie das Umladen auf den LKW. Die Zeit für diesen Transport wird auf etwa eine Minute geschätzt, welche auf 500 Bolzen aufgeteilt werden kann. Bei einem Verbrauch eines elektronischen Gabelstaplers von 4,1 kWh (vgl. Schilling und Bruns 2016, S. 6), welcher in der Datenbank ergänzt wurde, beträgt der Anteil eines Bolzen 0,0001366 kWh.

$$\text{Stromverbrauch Transport pro Bolzen: } \frac{4,1 \text{ kWh}}{60 \text{ min}} * \frac{1}{0,0683} = 0,0001366 \text{ kWh}$$

5.6.2.3. Galvanisierung

Für die Galvanisierung ist ein Transport zu einem externen Dienstleister für den Prozess die Voraussetzungen. Durch Pooling werden die Bolzen des Herstellers mit einem 7,5 t LKW transportiert. Für diese Transportmethode fallen gemäß Schmied et al. THG-Emissionen in Höhe von 147 g CO₂e pro tkm für Massengüter an (vgl. Schmied et al. 2011, S. 9), welche umgerechnet mit einem Wert von 0,000147 kg CO₂e pro kg/km in die Datenbank eingetragen wurden. Die Menge/Verbrauch beläuft sich auf 100 km sowie die 196,83 g, die durch das Gewicht des Bolzens anfallen. Das Gewicht wird jedoch auf 200 g aufgerundet, da die Bolzen gesichert (auf Paletten etc.) transportiert werden.

Der Bolzen hat eine Oberfläche von 116,11 cm², die durch die Formel „O = 2 * π * r² + 2 * π * r * h“ berechnet wird. Beim Galvanisieren wird eine Schichtdicke 12 μm Zink (Dichte von 7,14 g/cm³) ausgewählt, die mit einem Gesamtenergiebedarf von 4 kWh/m² aufgetragen wird (vgl. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz 2003, S. 18). So können 0,9933 g in das Excel-Tool eingegeben werden.

$$\text{Menge Zink: } 116,11 \text{ cm}^2 * 0,0012 \text{ cm} * 7,14 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 0,9933 \text{ g}$$

Der Stromverbrauch der Maschine bei einer Oberfläche von 116,11 cm² beläuft sich auf 0,04644 kWh.

$$\text{Stromverbrauch: } 0,011611\text{m}^2 * 4 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} = 0,04644 \text{ kWh}$$

5.6.2.4. Verpackung

Der Karton kommt auf ein Gewicht von etwa 200 g. Da der Karton mit 50 Bolzen gefüllt wird, ergibt sich ein Verpackungsgewicht von 4 g pro Bolzen. Zusätzlich entfällt auf den Bolzen erneut ein Transportaufwand von etwa einer Minute bei 500 Bolzen. Der Stromverbrauch pro Bolzen für diesen Gabelstaplerprozess beträgt ebenfalls 0,0001366 kWh (siehe 5.6.2.2).

5.7. Eingabe der Daten in das Excel-Tool

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse, die in das Excel-Tool implementiert wurden, wie in Abbildung 8 dargestellt, visualisiert. Die Prozesse sind klar aufgeführt, wobei Oberkategorien durch einen blauen Hintergrund hervorgehoben sind und die zugehörigen Unterkategorien zusammenfassen. Durch Multiplikation der Mengen/Verbräuche mit den entsprechenden Emissionsfaktoren aus den Datenbanken ergeben sich die endgültigen Treibhausgasemissionen (THG). Außerdem werden die Gesamt-THG in der letzten Zeile sowie die einzelnen Anteile der Ober- und Unterkategorien berechnet.

Prozess	Ressource	Menge / Verbrauch	Einheit	Emissionsfaktor ("Einheit" CO ₂ e pro Einheit)	"Einheit"	Treibhausgas emission (CO ₂ e in kg)	Oberkategorie Summe	Anteile
Materialbeschaffung							1,0196	84,73%
Einkauf: Anteil Edelstahl	Edelstahlblech	0,19683	kg	5,18	kgCO ₂ /kg	1,0195794		84,73%
Maschinenbearbeitung Biglia: Beladen, Fräsen, Drehen							0,1624	13,49%
Gabelstapler, elektrisch (4,1 kWh) - 1 Minute	Strommix, Deutschland	0,000137	kWh	0,334	kgCO ₂ /kWh	0,0000456244		0,00%
KSS (hydraulisch): KSS-Konzentrat-Anteil 10 %	Kühlschmierstoff, Ölhaltig	0,005938	kg	3,7	kgCO ₂ /kg	0,02196875		1,83%
KSS (hydraulisch): Wasseranteil 90 %	Wasser(H ₂ O)	0,005938	kg	0,00033	kgCO ₂ /kg	0,00000196		0,00%
Energieverbrauch Biglia bei 3 Minuten Bearbeitung	Strommix, Deutschland	0,37104	kWh	0,334	kgCO ₂ /kWh	0,12392736		10,30%
Abtrag: Drehen	Edelstahlblech	0,00097	kg	5,18	kgCO ₂ /kg	0,0050246		0,42%
Abtrag: Fräsen	Edelstahlblech	0,0022	kg	5,18	kgCO ₂ /kg	0,011396		0,95%
Galvanisieren							0,0212	1,76%
Energieverbrauch	Strommix, Deutschland	0,04644	kWh	0,334	kgCO ₂ /kWh	0,01551096		1,29%
Beschichtung	Zink(Zn)	0,000993	kg	2,72	kgCO ₂ /kg	0,002701776		0,22%
Transportweg hin- und zurück (100 km)	Diesel, LKW (7,5t) - Massengut	20	kg/km	0,000147	kgCO ₂ /km	0,00294000		0,24%
Verpackung							0,0003	0,02%
Gabelstapler, elektrisch (4,1 kWh) - 1 Minute	Strommix, Deutschland	0,000137	kWh	0,334	kgCO ₂ /kWh	0,0000456244		0,00%
Verpackungsmaterial	Pappe Kartontage	0,0004	kg	0,62	kgCO ₂ /kg	0,00024800		0,02%
Gesamt						1,203390054		

Abbildung 8: Excel-Tool – Implementierte Daten des Bolzens (eigene Darstellung)

5.8. Bewertung der Ergebnisse

Wie bereits visualisiert, entfällt der größte Teil des CO₂-Fußabdrucks mit 84,57 % auf die vorgelagerten Ketten, die den Rohstoff für die Bolzenherstellung produziert haben. Der eigene Anteil am PCF des Bolzens liegt bei 13,49 % (Maschinenbearbeitung und Verpackung). Hiervon entfällt der größte Anteil auf den Stromverbrauch, der auf den hohen Wert des Emissionsfaktors des Strommix sowie die dreiminütige Bearbeitungszeit zurückzuführen ist. Bei diesem Ansatz der Berechnungen entfallen kleinere Anteile auf den externen Prozess der Galvanisierung mit 1,76 %.

5.9. Nebenprodukte, Recycling und Ausschuss

Auch im Prozess der Bolzenherstellung bleiben Nebenprodukte und Ausschuss nicht aus. Aufgrund von Datenschutzgründen bleiben die genauen Ausschussquoten anonym. Es wäre jedoch möglich, einen geschätzten oder literarischen Prozentsatz auf die Prozesse aufzuschlagen. Während der Werkzeugverschleiß abgeschnitten wurde, sind andere Nebenprodukte wie der Abtrag bereits in die Bilanz eingeflossen. Es könnte in Betracht gezogen werden, diese durch Recyclingmaßnahmen mit gesenkten Emissionsfaktoren zu bilanzieren. Auch für das externe Galvanisieren liegen aus Datenschutzgründen keine genauen Werte vor.

5.10. Bewertung der Ergebnisse

Zum Abschluss des fünften Kapitels widmet sich der folgende Abschnitt der Analyse der Ergebnisse des PCFs des Bolzens und bietet eine Handlungsempfehlung. Anschließend erfolgt ein Vergleichsprozess, der ebenfalls mithilfe des Excel-Tools dargestellt werden kann.

5.10.1. Handlungsempfehlungen

Um den PCF der Bolzenherstellung in diesem Fall zu minimieren, bieten sich Optimierungen in der Materialbeschaffung und der Maschinenbearbeitung an, da diese Prozesse das größte Potenzial zur Verbesserung aufweisen. Der dominierende Anteil des CO₂-Fußabdrucks liegt beim bereits erworbenen Rohstoff, dem Edelstahl. Um diesen zu reduzieren, stehen zwei Optionen zur Verfügung: Entweder wird eine Ressource mit einem niedrigeren CO₂-Fußabdruck als der verwendete Edelstahl eingesetzt, oder die vorgelagerten Lieferketten müssen nachhaltiger gestaltet werden. Für die zweite Option ist der Lieferant des Edelstahls verantwortlich.

Der aktuelle Emissionsfaktor von 5,18 kg CO₂ pro kg basiert auf den Daten der Datenbank. Gemeinsam mit den Lieferanten der vorgelagerten Prozesse muss angestrebt werden, einen Wert zu erreichen, der unter dem der Datenbank liegt.

Dennoch bieten sich Möglichkeiten zur Optimierung der eigenen Prozesse an. Der größte Anteil der internen Abläufe entfällt auf den Energieverbrauch der Biglia mit 75,3 %. Hier lassen sich Verbesserungen durch kürzere Bearbeitungszeiten oder den Einsatz alternativer Energiequellen erzielen. Während viele Unternehmen bei der Optimierung ihrer Maschinenprozesse häufig an die Grenzen der technischen Machbarkeit im Rahmen ihrer finanziellen Möglichkeiten stoßen, sollte in Betracht gezogen werden, die Energiequelle für die Biglia zu wechseln, was ebenfalls Auswirkungen auf andere Prozesse wie den Gabelstaplerprozess haben könnte. Der Abtrag bei diesem Produkt ist mit 3,17 g (1,6 %) bereits sehr gering und vorerst akzeptabel. Dennoch können diese Abfälle gesammelt und recycelt werden, um einen niedrigeren Wert für den Emissionsfaktor zu erzielen. Die letzte Möglichkeit zur Optimierung betrifft das Kühlschmierstoffkonzentrat, das derzeit 14,7 % des eigenen PCF des Bolzens ausmacht. Hier bestehen ebenfalls die Optionen, ein effizienteres Produkt zu finden oder die Prozesse der Lieferanten zu verbessern.

5.10.2. Vergleichsprozess

Mit Hilfe von Abbildung 9 wurden die Handlungsempfehlungen im Excel-Tool visualisiert. Für die Prozesse, die den Edelstahl betreffen, wurde ein verbesserter Emissionsfaktor von 3,85 eingegeben. Durch Recycling wurde dieser Wert für eigene Prozesse weiter optimiert. Im Gegensatz zu Aluminium ließ sich zwar kein direkter Wert für die CO₂-Fußabdruckverbesserung durch Edelstahlrecycling finden, aber es wurde herausgefunden, dass sich Recycling positiv auf den Emissionsfaktor von Edelstahl auswirkt (vgl. Pothén et al. 2019, S. 3 f.). Aus diesem Grund wurde der niedrigere Emissionsfaktor mit 0,6 multipliziert, um eine Senkung von 40 % des Emissionsfaktors für den Abtrag zu bilanzieren.

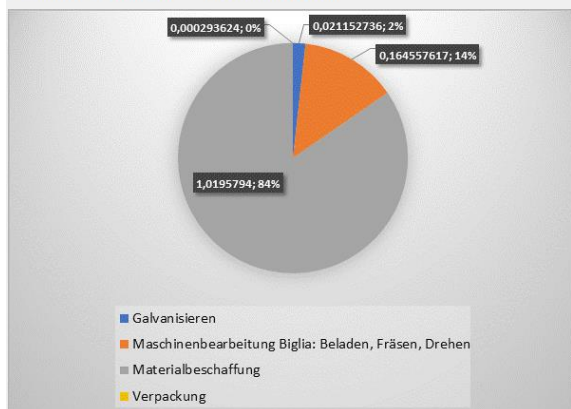
Prozess	V: Energieträger	V: Menge / Verbrauch	V: Einheit	V: Emissionsfaktor ("Einheit" CO ₂ e pro Einheit)	V: "Einheit"	V: Treibhausgasemission (CO ₂ e in kg)	V: Oberkategorie Summe	V: Anteile
Materialbeschaffung							0,7315	96,28%
Einkauf: Anteil Edelstahl	Edelstahlblech	0,19	kg	3,85	kgCO ₂ /kg	0,7315		96,28%
Maschinenbearbeitung Biglia: Beladen, Fräsen, Drehen							0,022351733	2,94%
Gabelstapler, elektrisch (4,1 kWh) - 1 Minute	Strom (Erneuerbare Quelle)	0,0001366	kWh	0	kgCO ₂ /kWh	0		0,00%
KSS (hydraulisch): KSS-Konzentrat-Anteil 10 %	Kühlschmierstoff, Ölfrei	0,006525	kg	2,3	kgCO ₂ /kg	0,0150075		1,98%
KSS (hydraulisch): Wasseranteil 90 %	Wasser(H ₂ O)	0,06525	kg	0,00033	kgCO ₂ /kg	0,00002153		0,00%
Energieverbrauch Biglia bei 3 Minuten Bearbeitung	Strom (Erneuerbare Quelle)	0,4	kWh	0	kgCO ₂ /kWh	0		0,00%
Abtrag: Drehen	Edelstahlblech	0,00097	kg	2,31	kgCO ₂ /kg	0,0022407		0,29%
Abtrag: Fräsen	Edelstahlblech	0,0022	kg	2,31	kgCO ₂ /kg	0,005082		0,67%
Galvanisieren							0,005641776	0,74%
Energieverbrauch	Strom (Erneuerbare Quelle)	0,04644	kWh	0	kgCO ₂ /kWh	0		0,00%
Beschichtung	Zink(Zn)	0,0009933	kg	2,72	kgCO ₂ /kg	0,002701776		0,36%
Transportweg hin- und zurück (100 km)	Diesel, LKW (7,5t) - Massengut	20	kg*km	0,000147	kgCO ₂ /km	0,00294000		0,39%
Verpackung							0,00030264	0,04%
Gabelstapler, elektrisch (4,1 kWh) - 1 Minute	Strom (Erneuerbare Quelle)	0,0001366	kWh	0	kgCO ₂ /kWh	0,00000000		0,01%
Verpackungsmaterial	Pappe Kartonage	0,0004	kg	0,62	kgCO ₂ /kg	0,00024800		0,03%
Gesamt						0,759796149		

Abbildung 9: Excel-Tool – Vergleichsprozess (eigene Darstellung)

Für den Vergleichsprozess wurde der Strommix durch eine erneuerbare Quelle ersetzt, die einen Emissionsfaktor von 0 hat und somit signifikant ins Gewicht fällt. Durch diese Maßnahme konnte der eigene Anteil am PCF von 13,67 % auf 2,98 % reduziert werden. Die Werte der beiden PCFs können nun mit dem Dashboard gegenübergestellt werden.

Abbildung 10 bietet einen Überblick über die beiden PCFs. Durch diese Maßnahmen würde der PCF von 1,2056 auf 0,7598 kg CO₂-Äquivalente sinken, welches einem Rückgang von 37 % entspricht.

Oberkategorien für den aktuellen PCF



Oberkategorien für den Vergleichs-PCF

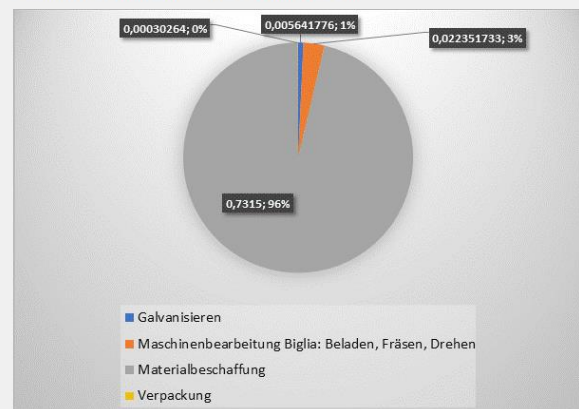


Abbildung 10: Excel-Tool: Dashboard – Oberkategorien (eigene Darstellung)

Die unterschiedlichen Unterkategorien, die im Dashboard angezeigt werden können, werden aus Platzgründen nicht dargestellt. Die Abbildung 11 veranschaulicht abschließend die Differenzen nach Ober- und Unterkategorien. Hier wird noch einmal deutlich, dass durch Anpassungen, insbesondere in der Materialbeschaffung und der Maschinenbearbeitung, der CO₂-Fußabdruck gesenkt werden könnte.

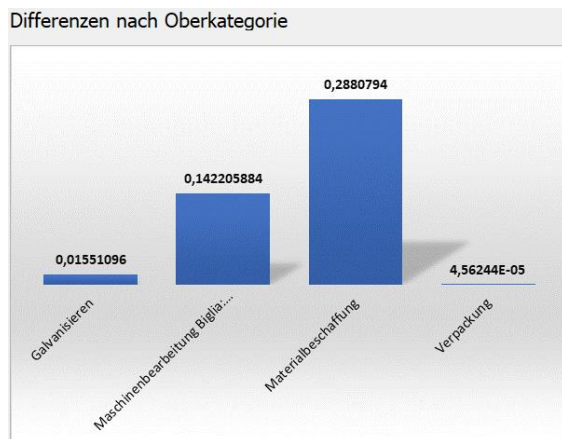


Abbildung 11: Excel-Tool: Dashboard - Differenz nach Oberkategorien (eigene Darstellung)

6. Schlussteil

Im Schlussteil dieses Berichts werden die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse einer gründlichen Analyse unterzogen. Zunächst erfolgt eine kritische Wertung, in der das Fazit präsentiert wird. Daraufhin werden mögliche Limitationen diskutiert sowie ein Ausblick auf potenzielle zukünftige Entwicklungen gegeben. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse.

6.1. Kritische Wertung

6.1.1. Fazit

Das vorgestellte Verfahren zur Berechnung des PCFs der Bolzenherstellung bietet eine solide Grundlage für die Bewertung der Umweltauswirkungen. Durch die systematische Übertragung des Leitfadens aus Kapitel 3 auf die dargestellte Bolzenproduktion wird veranschaulicht, wie die Hauptquellen von THG-Emissionen identifiziert und gezielte Maßnahmen zur Emissionsreduzierung entwickelt werden können.

Die vorgelegte Arbeit zeigt, dass die Herstellung eines Produktes erhebliche THG-Emissionen verursacht, insbesondere durch vorgelagerte Prozesse wie die Herstellung von Edelstahl. Die Analyse verdeutlicht die Optimierungspotentiale nicht nur für die internen Prozesse, sondern belegt auch die Notwendigkeit, die Partnerunternehmen der gesamten Lieferkette mit in die Verantwortung zu nehmen, ihre Prozesse nachhaltiger zu gestalten, um den PCF zu reduzieren.

Die Anwendung eines (Excel-)Tools zur Datenerfassung und -analyse erleichtert die Berechnung des PCFs und die Visualisierung der Ergebnisse. Dies trägt zur Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Verfahrens bei und ermöglicht eine effiziente Kommunikation der Ergebnisse an Stakeholder und Entscheidungsträger.

Im Rahmen der Bilanzierung des Demonstrationsprodukt wurde eine Identifizierung konkreter Handlungsempfehlungen zur Emissionsreduzierung durchgeführt. Diese umfassen die Optimierung von Materialbeschaffung, Maschinenbearbeitung und anderen Prozessen sowie die Suche nach alternativen Ressourcen und Produktionsmethoden. Durch gezielte Maßnahmen könnten signifikante Einsparungen beim CO₂-Ausstoß des Beispiels erzielt werden.

Trotz dieser positiven Aspekte gibt es einige Einschränkungen des vorgestellten Ansatzes. Die Genauigkeit der Ergebnisse kann durch ungenaue Daten oder Annahmen beeinträchtigt werden, und die Anonymisierung sensibler Informationen kann zu Verzerrungen führen. Darüber hinaus sollte beachtet werden, dass die Berechnung des PCFs nur ein Aspekt eines umfassenderen Nachhaltigkeitskonzepts ist und eine ganzheitliche Betrachtung erforderlich ist, um alle Umweltauswirkungen einer Produktion angemessen zu berücksichtigen. Des Weiteren berücksichtigt das vorgestellte Beispiel ausschließlich den Ansatz cradle to gate und ist somit nicht vollständig.

6.1.2. Limitation

Obwohl das vorgestellte Verfahren zur Berechnung des PCF der Bolzenherstellung viele Vorteile bietet, sind einige Limitationen zu berücksichtigen. Eine wesentliche Einschränkung besteht in der Verfügbarkeit und der Transparenz von Daten. Nutzung von Datenbanken ist nur für erste Entwürfe von PCFs eine sinnvolle Methode und spiegelt nicht den korrekten PCF des Produkts wider. Diese Daten sollten langfristig gegen eigene Erhebungen und Zertifikate der Lieferanten ausgetauscht werden.

Hier liegt ein weiteres Problem. Während Unternehmen über die Datenvalidation der eigenen Erhebungen die Kontrolle haben, wird es Probleme in der Transparenz der kommunizierten Werte der vorgelagerten Unternehmen geben. Diese verfügen in der Regel nicht nur über fehlende Ressourcen bezüglich Know-how sowie finanziellen und personellen Kapazitäten, sie haben aufgrund ihrer geografischen Lage (z. B. Asien) häufig auch kein Verständnis für den Bedarf eines solchen Zertifikats.

Für interne Berechnungen stellen Annahmen, die bei der Berechnung des PCFs getroffen werden, eine weitere Limitation dar. Diese Annahmen können je nach Kontext variieren und zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Zudem können unvorhergesehene Ereignisse oder Veränderungen in der Lieferkette die Genauigkeit der Berechnungen beeinflussen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Begrenzung des vorgestellten Ansatzes auf den cradle to gate, der nur die Emissionen bis zum Werkstor berücksichtigt. Dadurch werden wichtige Phasen des Produktlebenszyklus wie die Nutzung und Entsorgung nicht berücksichtigt, was zu einer unvollständigen Bewertung der Umweltauswirkungen führen kann. Der cradle to gate erfordert eine umfassende Datenerhebung und -analyse, welche zu erhöhtem Aufwand und Kosten führen kann.

Außerdem können ungenaue Daten oder Annahmen zu Verzerrungen in der Bewertung führen. Aktuell erscheint der cradle to gate Ansatz eine große Herausforderung, weil neben den vorgelagerten auch die nachgelagerten Partnerunternehmen kooperieren müssen.

Das Excel-Tool, das im Rahmen dieser Hausarbeit bereitgestellt wird, dient als erster Ansatz für eine PCF-Berechnung. Für eine kommunizierbare Bilanzierung sollte ein Partnerunternehmen mit Kenntnissen in der Erstellung von PCFs sowie gegebenenfalls einem professionellen Tool konsultiert werden.

Insgesamt ist die Bilanzierung von PCFs heutzutage noch ein komplexes Verfahren. Die Limitationen zeigen auf, dass trotz der Fortschritte bei der Berechnung des PCFs weitere Forschung und Entwicklung erforderlich sind, um genauere und umfassendere Methoden zur Bewertung der Umweltauswirkungen von Produkten zu entwickeln.

6.1.3. Ausblick

Im Ausblick auf zukünftige Entwicklungen in der Berechnung von PCFs könnten Fortschritte in der Datenerhebung und -analyse sowie in der Standardisierung und Transparenz von THG-Emissionsdaten erwartet werden. Neue Technologien und Methoden könnten eine genauere Bewertung ermöglichen und dazu beitragen, die Lücken und Unsicherheiten in den aktuellen Ansätzen zu verringern. Hierfür wäre es von Vorteil, wenn sich ein Standard zur Berechnung von PCFs über alle Branchen durchsetzt.

Darüber hinaus könnten verstärkte Bemühungen zur Sensibilisierung und Schulung von Unternehmen der gesamten Lieferkette und Verbrauchern dazu beitragen, die Bedeutung der THG-Bilanzierung zu erkennen und Maßnahmen zur Reduzierung des PCFs zu fördern.

6.2. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Hintergründe und Notwendigkeit von PCFs sowie den wichtigsten Methoden zur Bilanzierung und bietet einen Einblick in die Berechnung eines PCFs am Beispiel der Herstellung eines Bolzens. Durch die Anwendung eines Excel-Tools wurden die einzelnen Prozesse analysiert und visualisiert, um mögliche Optimierungspotenziale aufzuzeigen. Dabei wurde deutlich, dass die vorgelagerten Ketten einen signifikanten Beitrag zum Gesamt-PCF leisten. Handlungsempfehlungen zur Optimierung wurden formuliert, darunter die Verbesserung der Materialbeschaffung und der Maschinenprozesse sowie die Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Die Ergebnisse wurden durch Vergleiche und Visualisierungen veranschaulicht, um eine bessere Bewertung zu ermöglichen.

Ebenfalls wurden die Einschränkungen des Ansatzes, wie die begrenzte Verfügbarkeit von Daten und die Komplexität der Einbeziehung verschiedener Prozesse, identifiziert. Dennoch liefert die Arbeit wertvolle Einblicke und Handlungsempfehlungen für die PCF-Berechnung und -optimierung in der Herstellung von Bolzen und kann als Grundlage für weitere Forschungen und Praktiken dienen.

A. Eidesstaatliche Erklärung

Ich versichere ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Studienarbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt habe, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen ist. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Hamburg, den 10.05.2024

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Dietze' with a stylized flourish at the end.

Malte Dietze

B. Literaturverzeichnis

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (2003): *Effiziente Energienutzung in der Galvanikindustrie*. Online verfügbar unter [https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL\(artdtl.htm,APGxNODENR:1325,AARTxNR:lfu_klima_00020,AARTxNODENR:14732,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x\)=X.](https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL(artdtl.htm,APGxNODENR:1325,AARTxNR:lfu_klima_00020,AARTxNODENR:14732,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x)=X.), zuletzt geprüft am 27.04.2024.

BSI (2011a): PAS 2050:2011. *Publicly Available Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. Hg. v. British Standards Institution. BSI. London. Online verfügbar unter <http://clearcarbon-tech.com/data/upload/image/20210815/1629020896125747.pdf>, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

BSI (2011b): *The guide to PAS 2050:2011. How to carbon footprint your products, identify hotspots and reduce emissions in your supply chain*. Hg. v. British Standards Institution. BSI. London.

Buchenau, M.-W.; Menzel, S.; Müller, A.; Tyborski, R. (2019): CO₂-Pläne der Autobauer gefährden Zulieferer. In: *Handelsblatt* 2019, 2019. Online verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/automobilbranche-co2-plaene-der-autobauer-gefaehrden-zulieferer/25303842.html>, zuletzt geprüft am 19.11.2023.

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2024): *Informationsblatt CO₂-Faktoren*. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2024.html, zuletzt aktualisiert am 19.04.2024, zuletzt geprüft am 19.04.2024.

Bundesministerium der Justiz (2019): *Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz - BEHG)*. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/behg/BEHG.pdf>, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2019): *Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)*. KSG. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Gesetze/191118_ksg_lesefassung_bf.pdf, zuletzt geprüft am 23.11.2023.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2021): *Lesefassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 mit markierten Änderungen zur Fassung von 2019*. Online verfügbar unter https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/ksg_aendg_2021_3_bf.pdf, zuletzt geprüft am 23.11.2023.

Chuang, S.-P.; Huang, S.-J. (2018): The Effect of Environmental Corporate Social Responsibility on Environmental Performance and Business Competitiveness: The Mediation of Green Information Technology Capital. In: *Journal of Business Ethics* 150 (4), S. 991–1009. DOI: 10.1007/s10551-016-3167-x.

Damert, M.; Baumgartner, R. J. (2018): External Pressures or Internal Governance - What Determines the Extent of Corporate Responses to Climate Change? In: *Corporate Social Responsibility and Environmental Management* 25 (4), S. 473–488. DOI: 10.1002/csr.1473.

Das, s. K.; Green, J. A. S.; Kaufmann, G. (2010): Aluminum Recycling. Economic and Environmental Benefits. 68. Aufl. Hg. v. *Light Metal Age* (1).

Deutscher Bundestag (2022): *Drucksache 20/3438* Gesetzentwurf der Bundesregierung Entwurf eines Zweiten Gesetzes zur Änderung des Brennstoffemissionshandelsgesetzes. Online verfügbar unter <https://dserver.bundestag.de/btd/20/034/2003438.pdf>, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Deutsches Institut für Normung (2006a): *DIN EN ISO 14040:2006*. Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. Hg. v. DIN Deutsches Institut für Normung. Berlin, Beuth.

Deutsches Institut für Normung (2006b): *DIN EN ISO 14044:2006*. Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. Hg. v. DIN Deutsches Institut für Normung. Berlin, Beuth.

Deutsches Institut für Normung (2018): *DIN EN ISO 14067:2018*. Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung. Hg. v. DIN Deutsches Institut für Normung. Berlin, Beuth.

DIHK (2021): *Energiewende-Barometer 2021 der IHK-Organisation. Unternehmensumfrage zur Umsetzung der Energiewende*. Hg. v. Deutscher Industrie- und Handelskammertag. Berlin. Online verfügbar unter

<https://www.dihk.de/re-source/blob/58460/aca53bacc14cea080320089a6c57214b/energiewende-barometer-2021-data.pdf>, zuletzt geprüft am 25.11.2023.

Draucker, L.; Kaufman, S.; Meinrenken, C.; Kuile, R. t. (2011): Moving Forward on Product Carbon Footprint Standards. In: *Journal of Industrial Ecology* 15 (2), S. 169–171. Online verfügbar unter <http://wordpress.ei.columbia.edu/lenfest/files/2012/11/Moving-Forward-on-Product-Carbon-Footprint-Standards.pdf>, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Electricity Maps ApS (o. J.): *Live 24/7 CO₂ emissions of electricity consumption*. Online verfügbar unter <https://app.electricitymaps.com/zone/DE>, zuletzt aktualisiert am 23.04.2024, zuletzt geprüft am 23.04.2024.

Englisch, P.; Sahr, K.; Volkmann, C.; Blank, C.; Tokarski, T. O. (2012): *Nachhaltige Unternehmensführung. Lage und aktuelle Entwicklungen im Mittelstand*. Hg. v. Ernst & Young. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/57413318-Nachhaltige-unternehmensfuehrung.html>, zuletzt geprüft am 23.11.2023.

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2003): *Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates*. EU ETS. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02003L0087-20230605>, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

González-Benito, J.; González-Benito, Ó. (2010): A study of determinant factors of stakeholder environmental pressure perceived by industrial companies. In: *Business Strategy and the Environment* 19 (3), S. 164–181. DOI: 10.1002/bse.631.

Guenther, M.; Saunders, C. M.; Tait, P. R. (2012): Carbon labeling and consumer attitudes. In: *Carbon Management* 3 (5), S. 445–455. DOI: 10.4155/cmt.12.50.

Günther, E.; Nowack, M.; Weber, G. (2007): *CO₂-Management als Erfolgsfaktor für Unternehmen*. Hg. v. Technische Universität Dresden. Online verfügbar unter https://tu-dresden.de/bu/wirtschaft/bwl/bu/ressourcen/dateien/presse/klima_handelsblatt_12_070921/tu_dresden_guenther_erfolgsfaktor.pdf?lang=de, zuletzt geprüft am 19.11.2023.

- Hottenroth, H.; Schmidt, M.; Joa, B. (2013): Carbon Footprints für Produkte. *Handbuch für die betriebliche Praxis kleiner und mittlerer Unternehmen*. Hg. v. Hochschule Pforzheim. Institut für Industrial Ecology.
- Kagerl, C.; Moritz, M.; Roth, D.; Stegmaier, J.; Stepanok, I.; Weber, E. (2022): *Energiekrise und Lieferstopp für Gas: Auswirkungen auf die Betriebe in Deutschland* 102, S. 486–491. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s10273-022-3211-7>, zuletzt geprüft am 24.11.2023.
- Kaul, A.; Hagedorn, M.; Hartmann, S.; Heilert, D.; Harter, C.; Olschewski, I. et al. (2020): *Automobile Automobile Wertschöpfung 2030/2050. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*. Hg. v. IPE Institut für Politikevaluation GmbH und FKA GmbH, Roland Berger GmbH. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Studien/automobile-wertschoepfung-2030-2050-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=10, zuletzt geprüft am 19.11.2023.
- Lee, K.-H. (2012): Carbon accounting for supply chain management in the automobile industry. In: *Journal of Cleaner Production* 36, S. 83–93. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.02.023.
- Lewandowski, S.; Ullrich, A.; Gronau, N. (2021): Normen zur Berechnung des CO₂-Fußabdrucks. Ein Vergleich von PAS 2050, GHG Protocol und ISO 14067. In: *Industrie 4.0 Management* 2021 (4), Artikel 37, S. 17–20. DOI: 10.30844/I40M_21-4_S17-20.
- Lieback, J. U.; Buser, J.; Felker, Y.; Kroll, D.; Blume, F.; Hoffmann, M.; Kubin, K. (2020): *Leitfaden. Vom Energiemanagement zum Klimamanagement über 5 Stufen - in 14 Schritten*. Hg. v. Deutsche Unternehmensinitiative Energieeffizienz e.V., GUT Zertifizierungsgesellschaft für Managementsysteme mbH Umweltgutachter und ÖKOTEC Energiemanagement GmbH. Online verfügbar unter <https://www.oekotec.de/wp-content/uploads/2022/01/leitfaden-vom-energiemanagement-zum-klimamanagement.pdf>, zuletzt geprüft am 29.12.2023.
- Liu, T.; Wang, Q.; Su, B. (2016): A review of carbon labeling: Standards, implementation, and impact. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (53), S. 68–79. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403>

2115009132?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=850c6c2a6c9d4480, zuletzt geprüft am 06.11.2023.

ÖKOTEC Energiemanagement GmbH (2020): *Praxisleitfaden*. Product Carbon Footprint und CO2realtime. Hg. v. ÖKOTEC Energiemanagement GmbH. Online verfügbar unter https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-33355_01-Hauptbericht.pdf, zuletzt geprüft am 29.12.2023.

Olatunji, O. O.; Akinlabi, S. A.; Ayo, O. O.; Madushele, N.; Adedeji, P. A.; Fatoba, S. O. (2019): Drivers and barriers to competitive carbon footprint reduction in manufacturing supply chain: a brief review. In: *Procedia Manufacturing* 35, S. 992–1000. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.047.

Pachauri, R. K.; Mayer, L. (Hg.) (2015): *Climate change 2014. Synthesis report: longer report*. Intergovernmental Panel on Climate Change. [Geneva, Switzerland], Ottawa, Ontario: [Intergovernmental Panel on Climate Change]; Canadian Electronic Library. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf, zuletzt geprüft am 23.11.2023.

Peng, T.; Xu, X.; Wang, L. (2014): A novel energy demand modelling approach for CNC machining based on function blocks. In: *Journal of Manufacturing Systems* 33 (1), S. 196–208. DOI: 10.1016/j.jmsy.2013.12.004.

Pilarsky, G. (2014): *Wie stark Deutschland am Rohstofftropf hängt*. In: G. Pilarsky (Hg.): *Wirtschaft am Rohstofftropf. Der Kampf um die wichtigsten mineralischen Ressourcen*. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 59–85. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-00363-0_3.

Pothen, F.; Growitsch, C.; Engelhardt, J.; Reif, C. (2019): *Schrottbonus. Externe Kosten und fairer Wettbewerb in den globalen Wertschöpfungsketten der Stahlherstellung*. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS. Halle. Online verfügbar unter https://www.bdsv.org/fileadmin/user_upload/Studie_Schrottbonus_gesamt_final.pdf.

Rizos, V.; Behrens, A.; van der Gaast, W.; Hofman, E.; Ioannou, A.; Kafyeke, T. (2016): Implementation of Circular Economy Business Models by Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs): Barriers and Enablers. In: *Sustainability* 8 (11), S. 1212. DOI: 10.3390/su8111212.

- Sachs, A. (2018): *Wertschöpfungsnetzwerke Wertschöpfungsnetzwerke am Beispiel der deutschen Automobilindustrie*. Hg. v. Bertelsmann GED Focus Paper. Online verfügbar unter https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/MT_Wertscho__pfungsnetzwerke_Automobilindustrie.pdf.
- Schilling, T.; Bruns, R. (2016): Modulares Prognosemodell für den einsatzspezifischen Energieverbrauch von Gabelstaplern. In: *Logistics Journal: Proceedings* 2016 (05). Online verfügbar unter <https://www.logistics-journal.de/archive/proceedings/2016/fachkolloquium2015/4371/>.
- Schlütersche Fachmedien GmbH (2023): Der KSS für Prozesskosteneinsparung und Nachhaltigkeit. In: *Schlütersche Fachmedien GmbH*. Online verfügbar unter <https://www.nc-fertigung.de/der-kss-fuer-prozesskosteneinsparung-und-nachhaltigkeit>, zuletzt geprüft am 23.04.2024.
- Schmied, M.; Knörr, W.; Friedl, C. (2011): *Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik. Begriffe | Methoden | Beispiele*. Hg. v. DSLV Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V.
- Scrucca, F.; Barberio, G.; Fantin, V.; Porta, P. L.; Barbanera, M. (2021): Carbon Footprint: Concept, Methodology and Calculation. In: *Carbon Footprint Case Studies*, S. 1–31. DOI: 10.1007/978-981-15-9577-6_1.
- Sprengel, D. C.; Busch, T. (2011): Stakeholder engagement and environmental strategy – the case of climate change. In: *Business Strategy and the Environment* 20 (6), S. 351–364. DOI: 10.1002/bse.684.
- Statista (2022): *Umsatz der Unternehmen in Deutschland nach Unternehmensgröße im Jahr 2020*. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/731964/umfrage/umsatz-der-unternehmen-in-deutschland-nach-unternehmensgroesse/>, zuletzt aktualisiert am 25.11.2023, zuletzt geprüft am 25.11.2023.
- Statistisches Bundesamt (2021): *Anteile Kleine und Mittlere Unternehmen 2021 nach Größenklassen in %*. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Unternehmen/Kleine-Unternehmen-Mittlere-Unternehmen/aktuell-beschaefigte.html>, zuletzt aktualisiert am 29.08.2023, zuletzt geprüft am 25.11.2023.

- Steimer, S.; Arnold, C. (2020): *Nachhaltige Firmenveranstaltungen als Treiber einer nachhaltigen Unternehmensführung*. In: K. Butzer-Strothmann und F. Ahlers (Hg.): *Integrierte nachhaltige Unternehmensführung*. Berlin: Springer Gabler, S. 287–304. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-61168-5_16, zuletzt geprüft am 25.11.2023.
- Thiele, A.; Zwick, Y. (2023): *Mittelstand auf dem Weg. Wie KMU zum Erreichen der deutschen Klimaschutzziele beitragen*. In: U. Böhm, A. Hildebrandt und S. Kästle (Hg.): *Klimaneutralität in der Industrie. Aktuelle Entwicklungen - Praxisberichte - Handlungsempfehlungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, S. 101–107. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-66125-3_7.
- Umweltbundesamt (2021): *Emissionsquellen*. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen#energie-stationar>, zuletzt geprüft am 16.11.2023.
- Umweltbundesamt (2023): *Der Europäische Emissionshandel*. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel#teilnehmer-prinzip-und-umsetzung-des-europaischen-emissionshandels>, zuletzt aktualisiert am 24.11.2023, zuletzt geprüft am 24.11.2023.
- Wang, S.; Wang, W.; Yang, H. (2018): Comparison of Product Carbon Footprint Protocols: Case Study on Medium-Density Fiberboard in China. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (10). DOI: 10.3390/ijerph15102060.
- Weidema, B. P.; Thrane, M.; Christensen, P.; Schmidt, J.; Løkke, S. (2008): Carbon Footprint: A Catalyst for Life Cycle Assessment? In: *Journal of Industrial Ecology* 12(1).
- Wiedmann, T.; Minx, J. (2008): *A Definition of 'Carbon Footprint'*. In: C. C. Pertsova (Hg): *Ecological Research Trends*. Hauppauge NY, USA: Nova Science Publishers. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Jan-Minx/publication/247152314_A_Definition_of_Carbon_Footprint/links/00b7d52b42ae1d9583000000/A-Definition-of-Carbon-Footprint.pdf.
- WRI; WBCSD (2011): *Greenhouse Gas Protocol. Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*. Hg. v. World Ressource Institute und World Business Council for Sustainable Development. Washington und Geneva.

- Wühle, M. (2022): *Nachhaltigkeit messbar machen. Ein Praxisbuch für nachhaltiges Leben und Arbeiten*. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1007/978-3-662-66047-8>, zuletzt geprüft am 20.11.2023.
- Zabel, H.-U. (2011): Verhaltensmodellierung für Nachhaltigkeit unter besonderer Berücksichtigung empirischer Befunde. In: *Zeitschrift für Umweltpolitik & Umweltrecht* (3), S. 339–358.
- Zahoransky, R. (2015): *Kyoto-Protokoll*. In: Richard Zahoransky (Hg.): *Energietechnik*. Wiesbaden: Springer Verlag, S. 573–587. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-07454-8_20.