Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436–4980–2024–04–48

Nachhaltigkeit in Produktion und Logistik

Echtzeitnahe Dokumentation von Treibhausgasemissionen auf Basis der Verwaltungsschale

M. Maier, M. Hentsch, C. Schillinger, J. Siegert, D. Palm

ZUSAMMENFASSUNG Dieser Beitrag stellt eine Methodik zur echtzeitnahen Erfassung und Dokumentation von Treibhausgasemissionen in komplexen Wertschöpfungsnetzwerken vor. Die Methodik orientiert sich konzeptionell an relevanten Normen und Ansätzen im Kontext der Treibhausgasbilanzierung. Sie gestattet eine systematische produktionssynchrone, (teil-)autonome Erfassung der Treibhausgasemissionen von Produktions- und Logistikprozessen auf Basis produktbezogener Verwaltungsschalen.

STICHWÖRTER

Product Carbon Footprint (PCF), Verwaltungsschale (AAS), Treibhausgasbilanzierung (THG-Bilanzierung)

Near-Real-Time Documentation of Greenhouse Gas Emissions Using Asset Administration Shells

ABSTRACT This article presents a methodology for the near-real-time recording and documentation of greenhouse gas emissions in complex value creation networks. The methodology is conceptually based on relevant standards and approaches in the context of greenhouse gas accounting. It allows a systematic, production-synchronous, (partially) autonomous recording of greenhouse gas emissions from production and logistics processes based on product-related administrative shells.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Treibhausgasemissionen sind Verursacher des anthropogenen Klimawandels, der schon heute signifikante Auswirkungen auf die Umwelt und Gesellschaft hat. Jede zusätzliche Emission führt zu einer weiteren Erwärmung, welche Extremwettersituationen begünstigt. Eine aktuelle Studie aus dem Jahr 2022 prognostiziert bis zum Jahr 2050 volkswirtschaftliche Schäden durch Extremwetter in Deutschland zwischen 280 und 900 Milliarden Euro, je nach weiterer Entwicklung des Klimawandels [1]. Eine Reduktion der Treibhausgasemissionen ist daher auch unabhängig ökologischer Betrachtungen erstrebenswert, um wirtschaftliche Schäden zu begrenzen. Im industriellen Sektor Deutschlands besteht dabei ein erhebliches Optimierungspotenzial. Von den 667 Terawattstunden Endenergieverbrauch des Sektors Industrie im Jahr 2022 wurden mehr als die Hälfte aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern wie Stein- und Braunkohle, Mineralölprodukten sowie Erdgas gewonnen [2].

Ein effektiver Weg zur Reduzierung klimarelevanter Emissionen ist der Umstieg von fossilen zu erneuerbaren Energiequellen, da diese in der Bilanz keine weitere Klimaerwärmung verursachen. Die Transformation hin zu erneuerbaren Quellen erfordert Investitionen in Infrastruktur, Technik und Prozesse. Parallel dazu bietet die zielgerichtete Optimierung emissionsintensiver industrieller Prozesse eine weitere Möglichkeit zu handeln. Dies erfordert allerdings eine präzise Identifikation der emissions- und energieintensiven Prozesse eines Unternehmens. Um diese Transparenz zu ermöglichen, existieren eine Vielzahl von Normen und Standards zur Bilanzierung von Treibhausgasemissionen auf Unternehmens-, Produkt- und Prozessebene. Sie legen spezifische Berechnungsmethoden, zulässige Datenquellen sowie Abschneidekriterien bei der Analyse und Kalkulation fest. In der industriellen Praxis ist die Berechnung jedoch mit einer Reihe von Herausforderungen konfrontiert. Werden die notwendigen Daten nicht automatisiert erfasst und gespeichert, ist es erforderlich diese für die Berechnung in aufwendiger manueller Arbeit zusammenzutragen und zu verarbeiten. Eine geringe Datenqualität kann dazu führen, dass die Berechnung zu unzureichend belastbaren Ergebnissen führt, weshalb abgeleitete Maßnahmen nicht ihr volles Potenzial entfalten könnten. Diese Defizite sind insbesondere in Anbetracht der Tatsache problematisch, dass heutige Wertschöpfungsketten durch eine hohe Komplexität und eine Vielzahl interagierender Akteure gekennzeichnet sind. Für eine ganzheitliche und präzise Bestimmung der Emissionen aber, sind Daten aus allen Phasen der Wertschöpfungskette notwendig. Die erforderliche Durchgängigkeit der Daten entlang der gesamten Kette ist jedoch in der aktuellen Praxis nicht immer gegeben. [3–5] Dazu kommt, dass Standards und Normen in der Regel auf aggregierten historischen Daten basieren, welche die Möglichkeiten einer echtzeitnahen Optimierung der Prozesse erheblich einschränken könnten.

Als vielversprechender Ansatz zur Überwindung der Herausforderungen gilt das Konzept der sogenannten Verwaltungsschale (engl. Asset Administration Shell) für die standardisierte digitale Repräsentation von Assets entlang der gesamten Wertschöpfungskette [6]. Die Struktur und Eigenschaften der Verwaltungsschale sind in einer detaillierten, öffentlich zugänglichen Spezifikation

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-48 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

festgehalten [7]. Die Verwaltungsschale kann beliebig viele anwendungsorientierten Teilmodelle enthalten, die Informationen zu Eigenschaften, Betriebszustände, Fähigkeiten oder Nutzung des Assets festhalten. Die Teilmodelle durchlaufen einen Standardisierungsprozess und werden im Anschluss veröffentlicht [8]. Auch für die Erfassung von produktbezogenen Treibhausgasemissionen wurde in diesem Kontext bereits ein spezifisches Teilmodell entwickelt und veröffentlicht, das den Namen „Carbon Footprint“ trägt. Dieses Modell ermöglicht es, die berechneten Emissionen eines Assets zu erfassen und entlang der Wertschöpfungskette transparent zu machen. Es unterstützt ebenfalls die Aggregation von Emissionen zusammengesetzter Assets. Hierbei setzt das Modell jedoch voraus, dass die Emissionen bereits gemäß bestehenden Normen berechnet wurden. [9]

Neben den ökologischen und ökonomischen Gründen für eine präzise Erfassung und Reduktion von Treibhausgasemissionen, gewinnen auch gesetzliche Anforderungen und Markttrends zunehmend an Bedeutung. So plant die Europäische Union im Rahmen des Green Deals die Einführung eines digitalen Produktpasses, der Auskunft über die Nachhaltigkeit und Kreislauffähigkeit von Produkten geben soll. Zu den geforderten Informationen gehören dabei auch die produktbezogenen Treibhausgasemissionen. Ziel ist es, Unternehmen zukünftig zu verpflichten, entsprechende Daten zu erfassen und bereitzustellen. [10]

1.2 Ziel der Forschungsarbeit

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist eine Methodik zur echtzeitnahen Erfassung und Dokumentation von produktbezogenen Treibhausgasemissionen der Herstellungsphase über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg. Dabei sollen die Strukturen und Potenziale der Verwaltungsschale genutzt werden, um eine durchgängige Weitergabe dieser Daten über Unternehmensgrenzen hinweg und somit eine ganzheitliche Betrachtung der Emissionen zu ermöglichen.

Ein wesentlicher Aspekt des Forschungsvorhabens ist die Erfassung und Berücksichtigung von Industrieanforderungen an die Emissionserfassung. Dadurch soll eine hohe Akzeptanz und Anwendbarkeit in der industriellen Praxis sichergestellt werden. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die Identifikation und Integration relevanter Normen und Standards für die Treibhausgasbilanzierung als normative Grundlage der zu entwickelnden Methodik. Zudem sollen die bestehenden Aktivitäten im Rahmen der Entwicklung des Teilmodells „Carbon Footprint“ für die Verwaltungsschale berücksichtigt und darauf aufgebaut werden. Ziel ist es, die vorhandenen Initiativen fortzuführen und zu erweitern, um die Erfassung und Dokumentation von Treibhausgasemissionen präziser, zuverlässiger und flexibler zu gestalten.

Die angestrebte Methodik soll neue Anwendungsmöglichkeiten für eine echtzeitnahe Steuerung und Optimierung von Produktions- und Logistikprozessen im Hinblick auf produktbezogene Treibhausgasemissionen eröffnen. Durch die Bereitstellung granularer, aktueller Daten können Unternehmen dynamisch reagieren und gezielt Maßnahmen zur Emissionsreduktion ergreifen. Damit leistet die Forschungsarbeit einen wichtigen Beitrag zur Transformation hin zu umweltverträglichen und wettbewerbsfähigen Wertschöpfungsnetzwerken und unterstützt die Bewältigung der globalen Herausforderungen des Klimawandels.

2 Hintergründe und Vorgehensweise zur Konzeption der Methodik

Die Methodikentwicklung folgt einem iterativen Prozess, der die Anforderungen der Industriebeiratsmitglieder des Projekts „FlipCO2“, aktuelle Standards und neueste wissenschaftliche Erkenntnisse integriert. Die Untersuchungen im Projekt konzentrierten sich auf die drei im Industriebeirat repräsentierten Unternehmen, die zusammen ein vollständiges Wertschöpfungssystem von Materiallieferanten über Maschinenbauer bis zum Anlagennutzer im produzierenden Gewerbe abbilden. Ziel der Diskussionen mit den Entscheidungsträgern war die Anforderungsdefinition für das Konzept zur Erfassung des Product Carbon Footprints (PCF). Im folgenden Schritt wurden die relevanten Normen für die Erfassung von produktbezogenen Treibhausgasemissionen identifiziert mit den Anforderungen der Unternehmen zusammengeführt. Auf Grundlage der Anforderungen wurde ein konzeptioneller Rahmen entwickelt, der eine differenzierte Betrachtung von Logistik und Produktion vorsieht. Die Methodik sieht dabei eine automatisierte Datenaggregation aus diversen Quellen und die Erfassung direkt und indirekt messbarer Emissionsentstehung vor. Es wurde zudem am bereits entwickelten „Carbon Footprint” Teilmodell für die Verwaltungsschale angeknüpft, um die Potenziale für die Weitergabe der Daten über Unternehmensgrenzen hinweg zu nutzen und auf einer soliden technischen Basis aufzubauen.

Der besondere Mehrwert der Methodik liegt darin, eine industrialisierbare Lösung entlang realer Wertschöpfungsketten entwickelt zu haben, die sich durch geringe Komplexität auszeichnet. Diese Lösung basiert auf den Anforderungen der industriellen Praxis und vereint sie mit theoretischen Überlegungen hinsichtlich der Skalierbarkeit.

2.1 Identifizierte Industrieanforderungen

Die Integration von Industriepartnern in Konzeption und Entwicklung führte zu einer Methodik, die nicht nur praxisorientierte Lösungen bietet, sondern auch präzise auf die Herausforderungen und Bedürfnisse der Industrie zugeschnitten und mit aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen verbunden ist. Dadurch wird eine effektive Verknüpfung von theoretischer Grundlage und praktischer Anwendbarkeit gewährleistet.

Die identifizierten Industrieanforderungen für die Erfassung des Product Carbon Footprints, die sich auf die Verwaltungsschalentechnologie stützen, sind vielfältig und zielen auf die Entwicklung einer effizienten, präzisen und zukunftsfähigen Lösung ab.

Die Bedürfnisse der Industriepartner, die in diesem Projekt aus den Sektoren der Produktion von Industrie- und Konsumgütern sowie der Logistik mitwirkten, ließen sich zu vier zentralen Anforderungen an die Erfassungsmethodik konsolidieren:

- Entwicklung einer Methodik, die industriell anwendbar, in der Quantifizierung des Product Carbon Footprints (PCF) präzise ist und aktuelle wissenschaftliche Standards sowie Normen im Bereich der Emissionserfassung und -verfolgung integriert, bei gleichzeitig minimierter Komplexität.
- Die Methodik soll konzeptionell in die bestehende IT-Infrastruktur von Unternehmen, insbesondere in ERP-Systeme, integrierbar sein. Ziel ist es, die effiziente Nutzung vorhandener Datenressourcen zu gewährleisten und gleichzeitig kosten-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-48 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

intensive Datenerfassungsprozesse so weit wie möglich zu reduzieren.
- Die Methodik, umgesetzt auf Basis der Verwaltungsschalentechnologie, muss konzeptionelle Adaptivität gewährleisten. Diese Adaptivität soll es ermöglichen, kontinuierlich auf evolutionäre Entwicklungen in Normen und Richtlinien zu reagieren, ohne dass wesentliche Änderungen an der grundlegenden Struktur der Methodik notwendig sind.
- Die Anwendung der Methodik sollte ohne erheblichen Mehraufwand erfolgen, um die Adaptation in die existenten operativen Abläufe der Organisation zu erleichtern und die Nutzung vorhandener Ressourcen ermöglichen, ohne signifikante Modifikationen in der existierenden Organisationsstruktur zu erfordern.

Die artikulierten Forderungen seitens der Industrie zeigen ein deutliches Bestreben, Nachhaltigkeitsziele auf pragmatische und effiziente Weise zu erreichen, ohne dabei operative Prozesse signifikant zu belasten und bilden damit die fundamentalen Anforderungen an die entwickelte Methodik.

2.2 Identifikation und Konsolidierung der Normungslandschaft

Die Entwicklung der Methodik fußt auf der strukturierten Identifikation und Zusammenführung relevanter Normen und Richtlinien, die sowohl direkt als auch indirekt für die Erfassung von Treibhausgasemissionen in komplexen Wertschöpfungsnetzwerken zur Anwendung kommen können. Der harmonisierte EU-Binnenmarkt diente dabei als Untersuchungsrahmen, um relevante Standards zu identifizieren und zu vergleichen.

Bei der Recherche wurden folgende Normen und Richtlinien als relevant für den Produktions- und Logistikbereich identifiziert:

- **DIN EN ISO 14064–1:2019–06**
  Die Norm DIN EN ISO 14064–1:2019–06 bietet eine Spezifikation für die Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und deren Entzug auf Organisationsebene. Sie definiert somit die grundlegenden Prinzipien und Anforderungen für die Emissionsberichterstattung einer Organisation. [11]
  Diese Norm wird in der Methodenentwicklung benötigt, um Abschreibungsstrategien von Anlagen, Gebäuden und sonstiger Infrastruktur auf einzelne Produkte zu ermöglichen und ist nicht direkt mit den spezifischen Produktzentrierten Normen und Richtlinien zu vergleichen.
- **DIN EN ISO 14067:2019–02**
  Die Norm DIN EN ISO 14067:2019–02 legt Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien für die quantitative Erfassung und Berichterstattung des (partiellen-)PCF fest. Sie ist weitgehend konsistent mit Standards zur Ökobilanzierung und Lebenszyklusanalyse (LCA) und beinhaltet sowohl vollständige als auch teilweise Quantifizierungsstrategien des PCF. Es ist zu beachten, dass sich diese Methodik ausschließlich auf die Wirkungskategorie Klimawandel konzentriert und somit keine weiteren produktbezogenen Aspekte wie ökonomische, soziale oder zusätzliche Umweltfaktoren aus dem Lebenszyklus des Produkts berücksichtigt. [12]
  Anzumerken ist, dass sich die betrachtete Methodenentwicklung ausschließlich auf die Produktlebenszyklusphase der Produktion und die dazugehörigen Logistikprozesse konzentriert.
- **PAS 2050:2011**
  Die PAS 2050:2011 ist eine Norm für die Bewertung der Lebenszyklustreibhausgasemissionen von Gütern und Dienstleistungen. Sie bietet eine Methode zur Quantifizierung der Treibhausgasemissionen basierend auf der Lebenszyklusanalyse (LCA), um Organisationen bei der Identifizierung und Reduzierung ihrer Umweltauswirkungen im Zuge der Produktion und Bereitstellung ihrer Produkte und Dienstleistungen zu unterstützen. [13]
- **Greenhouse Gas Protocol (GHG-Protocol)**
  Das Greenhouse Gas Protocol, veröffentlicht von World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) und dem World Resources Institute (WRI), ist ein international anerkannter und weltweit häufig eingesetzter Standard für die Erfassung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen. Es bietet Unternehmen, Regierungen und anderen Organisationen Rahmenbedingungen und Werkzeuge, um ihre Emissionen präzise zu messen, zu verwalten und zu reduzieren, und fördert damit Transparenz und Verantwortlichkeit im Kontext des Klimaschutzes. [14]

Der Vergleich zwischen DIN EN ISO 14067:2019–02, PAS 2050:2011 und dem GHG-Protokoll verdeutlicht, dass alle drei Standards eine systematische Erfassung von Treibhausgasemissionen ermöglichen, was eine transparente Bewertung der Klimawirksamkeit des untersuchten Objekts gewährleistet. Konzeptionelle Unterschiede zwischen den Verfahren wurden teilweise festgestellt. Rechtsraumbezogene Differenzen bleiben aufgrund des technischen Fokus der entwickelten Lösung unberücksichtigt.

Generell kann festgehalten werden, dass insbesondere das GHG-Protocol, vermutlich aufgrund dessen Herkunft (keine Normungsorganisation), seine breitere Einbindung von Stakeholdern in den Entwicklungsprozess und daraus folgend einen weiter gefassten und flexibleren Erfassungsrahmen mit dezidierten Protokollen für verschiedene Anwendungsbereiche aufweist. Im Gegensatz dazu stellen DIN EN ISO 14067:2019–02 und PAS 2050:2011 sehr spezifische Anforderungen an die Erfassung und Dokumentation. Ebenso konnten unterschiedliche Anwendungsbereiche ermittelt werden. So konzentriert sich die DIN EN ISO 14067:2019–02, PAS 2050:2011 primär auf PCFs, während das GHG-Protocol zusätzlich zur Abbildung von unternehmensbezogenen Emissionen herangezogen werden kann.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass aufbauend auf allen drei Leitlinien und Normen (DIN EN ISO 14067:2019–02, PAS 2050:2011, GHG-Protocol) eine produktionszentrierten PCF-Erfassung möglich ist, jedoch partielle Unterschiede in den Ausgestaltungen und damit durch die Verfahren erfassten Treibhausgasmengen vorhanden sind.

Das die drei Ansätze dennoch zur Bestimmung von Treibhausgasemissionen geeignet sind, wenn auch teils aufgrund unterschiedlicher Erfassungsvorgaben divergierte Treibhausgasmengen ermittelt werden, resümieren auch *Lewandowski et al.* [15].

Im Rahmen der Recherche wurden für den Bereich der Logistik zudem nachfolgende Normen und Richtlinien als relevant identifiziert:

- **DIN EN 16258:2013–03**
  Diese europäische Norm legt eine „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen" [16] sowohl im Güter- als auch Personenverkehr fest. Sie definiert Grundsätze, Systemgrenzen, Berechnungsverfahren und Allokationsregeln

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-48 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

mit dem Ziel, genaue und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. [16] Sie trat Anfang März 2013 in Kraft und ist zu Gunsten der DIN EN ISO 14083:2023–11 (s.u.) mittlerweile zurückgezogen.

- **Global Logistics Emissions Council (GLEC) Framework**
  Das GLEC Framework ist eine Richtlinie zur Berechnung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen in der Logistik und wird von der Organisation Smart Freight Centre veröffentlicht. Es orientiert sich an bestehenden Standards wie dem GHG Protocol und deckt dabei Emissionen der Scopes 1, 2 und 3 ab. [17]
- **DIN EN ISO 14083:2023–11**
  Diese neu veröffentlichte Norm dient der „Quantifizierung und Berichterstattung über Treibhausgasemissionen von Transportvorgängen" [16]. Sie baut auf bestehenden Normen wie der DIN EN 16258:2013–03, dem GHG Protokoll und dem GLEC Framework auf und führt diese zusammen. Die Norm definiert und regelt von der Datenerhebung über die Berichtsanforderungen bis hin zu Allokationsverfahren eine Vielzahl relevanter Aspekte um eine konsistente Ermittlung von Emissionen über die gesamte Transportkette zu ermöglichen. Sie ergänzt die bestehenden Standards der Umweltnormreihe ISO 14000 ff um die Perspektive der Logistik. [16]

Mit der Veröffentlichung der DIN EN ISO 14083:2023–11 im Jahr 2023 wurden die Anforderungen und Leitlinien zur Quantifizierung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen aus Transportketten konsolidiert. Aufgrund ihrer umfassenden Abdeckung und Aktualität wurde diese bei der Entwicklung der vorgestellten Methodik im Bereich der Logistik besonders berücksichtigt.

Die Auswertung und Zusammenführung der beschriebenen Normen in Hinblick auf die gemäß Industrieanforderungen gewünschte effiziente Ermittlung von PCF´s führt zu dem Schluss, dass eine konzeptionelle Aufteilung der Treibhausgasemissionserfassung in die Bereiche Produktion und Logistik aufgrund der teilweise sehr spezifischen Erfassungsanforderungen zweckmäßig ist.

3 Theorie der Methodik

Das Ziel besteht darin, die mit einem Produkt verbundenen Emissionen über den gesamten Entstehungsprozess hinweg genau und transparent zu erfassen. Ein Kernaspekt dieses Ansatzes ist die Nutzung und Analyse von Daten aus allen Stufen der Produktions- und Logistikkette, einschließlich der jeweiligen spezifischen Emissionsquellen. Dieser Ansatz stützt sich auch auf die vorhandenen Datenstrukturen in den Unternehmen, wie ERP-Systeme und bestehende Messvorrichtungen zur Verbrauchserfassung auf der Shop-Floor- und Werkebene, um eine durchgängige und effiziente Datensammlung zu gewährleisten.

Die methodische Grundlage der entwickelten Methodik basiert darauf, eine umfassende, systematische und automatisierte Erfassung aller für die Berechnung des PCF relevanten Emissionsvariablen zu ermöglichen. Für Parameter, die sich nicht direkt messen lassen oder deren direkte Messung ökonomisch nicht vertretbar ist, wird auf methodische Ansätze zurückgegriffen, die eine Emissionsapproximation im Einklang mit geltenden Standards und Richtlinien ermöglichen. Diese methodologische Vorgehensweise sichert eine hohe Präzision und Konsistenz bei der Schätzung von Treibhausgasemissionen, basierend auf den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen und normativen Vorgaben.

Im Kontext der Methodikentwicklung ist hervorzuheben, dass die existierenden Normen, Richtlinien und Verfahren zur strukturierten Erfassung von Treibhausgasemissionen in Wertschöpfungsketten nicht unmittelbar und vollständig in der Methodik repliziert wurden. Stattdessen ist eine Herangehensweise gewählt worden, die die essenziellen Aspekte und Anforderungen in einer eigenständigen, adaptierbaren Systematik konsolidiert. Diese Entscheidung, nicht sämtliche relevanten Normen direkt in der Methodologie abzubilden, sondern vielmehr einen flexiblen Ansatz zu verfolgen, der sich an vorherrschenden Standards orientiert, zeigt den innovativen Charakter der Methodik und ihre Fähigkeit, auf zukünftige Entwicklungen proaktiv reagieren zu können.

Die entwickelte Methodik basiert auf einem konzeptionellen Rahmen, der eine differenzierte Betrachtung von Logistik und Produktion vorsieht, um eine zielgerichtete Erfassung und Analyse der Treibhausgasemissionen zu ermöglichen. Diese Trennung reflektiert die Unterschiede in den Emissionsquellen und die spezifischen Normen und Richtlinien, die für jeden Bereich gelten.

Der Modellierungsansatz fußt auf der grundlegenden Annahme, dass sich Gesamtprodukte aus mehreren Teilprodukten zusammensetzen können, deren assoziierte PCFs innerhalb der Verwaltungsschale aggregiert werden, um den PCF des Gesamtprodukts wissenschaftlich präzise zu bestimmen.

Die differenzierte Betrachtung des „Datenmodell-Produktion" und des „Datenmodell-Logistik" zur Erfassung des Gesamtprodukt-Carbon-Footprints innerhalb der Wertschöpfungskette, illustriert in **Bild 1**, reflektiert die vorgenommene methodische Trennung, die eine präzisere Analyse und Verwaltung der Treibhausgasemissionen entlang verschiedener Produktions- und Logistikprozesse ermöglicht. Diese Segmentierung gewährleistet eine spezifische Zuordnung und detaillierte Bewertung der Emissionen in beiden Teilbereichen, was eine ganzheitliche Betrachtung des Carbon Footprints des Gesamtproduktes innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette erlaubt. Die separate Erfassung ermöglicht nicht nur eine gezielte Identifikation emissionsintensiver Prozessabschnitte, sondern auch die Implementierung spezifischer Reduktionsstrategien, die auf die jeweiligen Bereiche zugeschnitten sind.

3.1 Datenmodell – Produktion

Das Datenmodell-Produktion zur Erfassung der Produktions-PCF repräsentiert ein methodisches Konzept im Bereich der präzisen Quantifizierung von Treibhausgasemissionen auf Produktionsprozessebene.

Konzeptionelles Kernmerkmal des Datenmodells ist die automatisierte Aggregation diverser, im Unternehmenskontext vorhandener Datenquellen (Produktions-IT, Messungen, Prognosedaten) auf Basis der Verwaltungsschale, ausgerichtet an aktuellen Standards und etablierten Verfahren der industriebezogenen Nachhaltigkeitsberichterstattung.

Die Architektur des Datenmodells „Produktion" zeichnet sich durch Flexibilität und Erweiterbarkeit aus, was eine kontinuierliche Anpassung an technologische Fortschritte und neue Erkenntnisse, ohne Beeinträchtigung der Grundstruktur ermöglicht. Der Detaillierungsgrad der Implementierung des Datenmodells in reale Anwendungen kann abhängig der geforderten Modellgranu-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-48 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

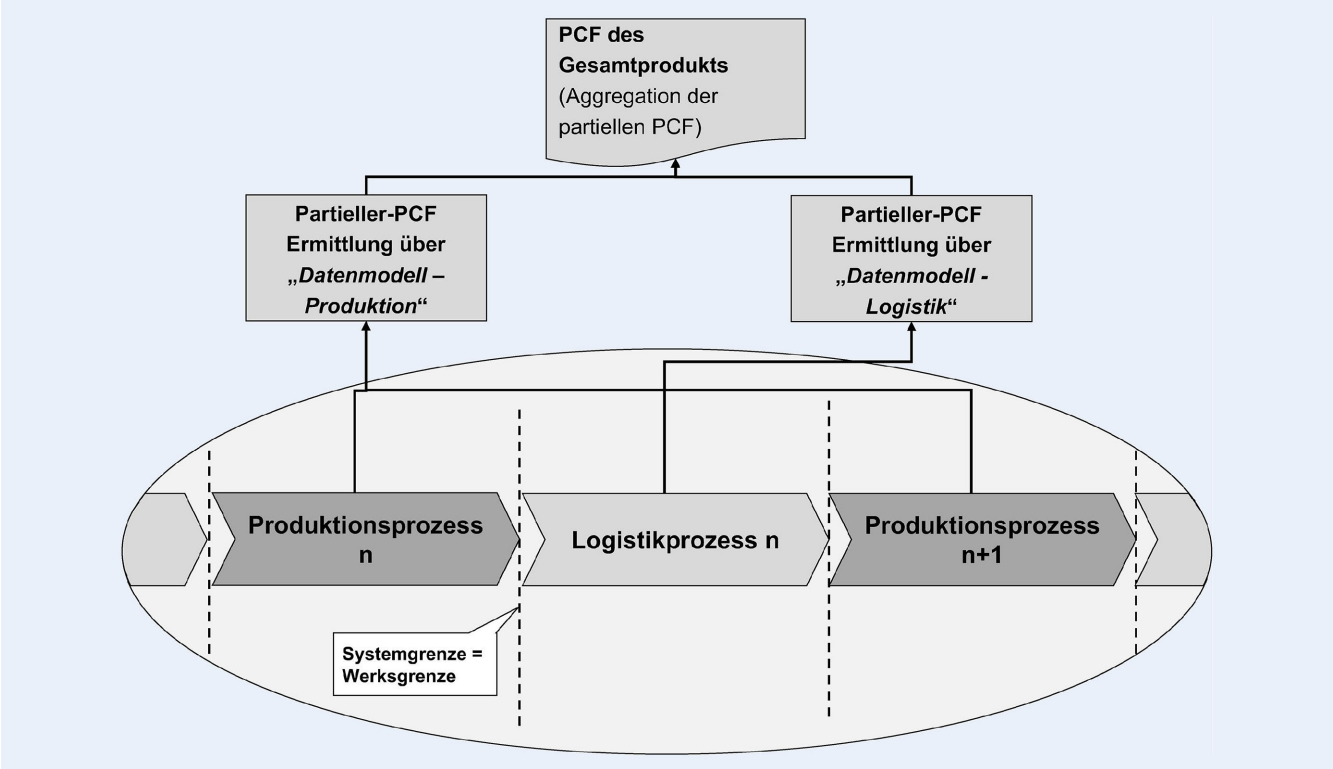

Bild 1. Konzeptioneller Aufbau der getrennten Erfassung von Produktions-PCF und Logistik-PCF mit nachgelagerter Aggregation im Gesamt-PCF.
Grafik: Eigene Darstellung

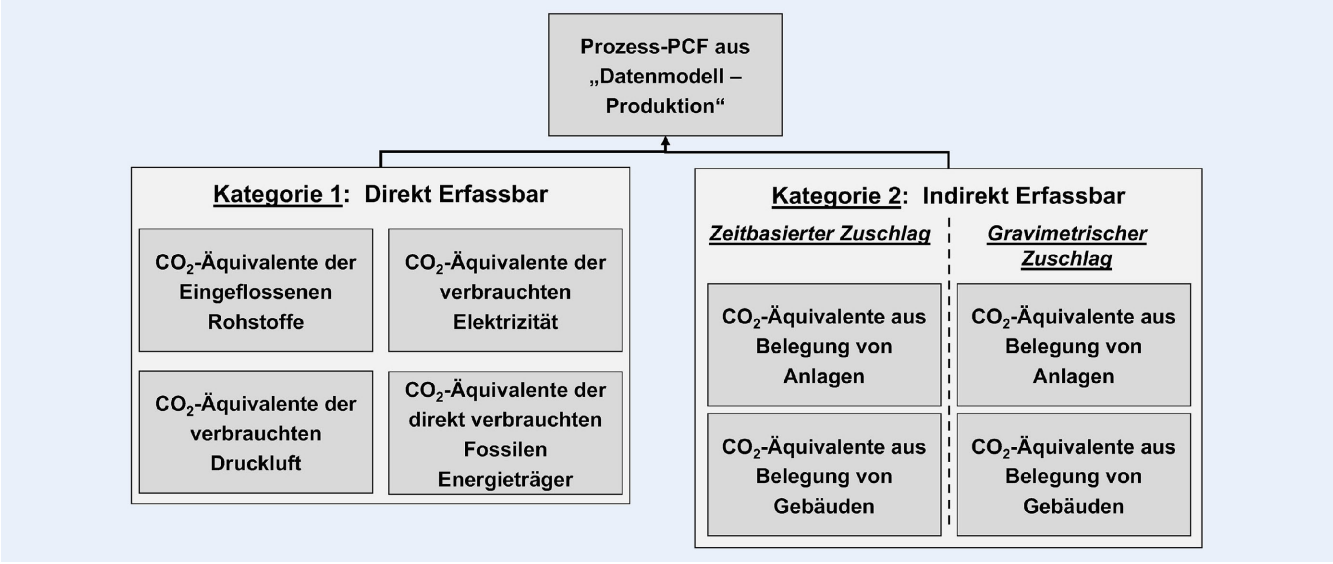

Bild 2. Struktur des Prozess-PCF des Teilmodells „Datenmodell-Produktion” der Erfassung der Emissionen auf Prozessebene.
Grafik: Eigene Darstellung

larität frei gewählt werden. Die Konzeption mit Blick auf Implementierungsmöglichkeit in unterschiedliche Softwarelösungen intendiert die Etablierung eines offenen Standards für die PCF-Erfassung, auf Grundlage der Verwaltungsschalentechnologie.

Der konzeptionelle Grundaufbau der des Datenmodells zur Erfassung und Dokumentation der emissionswirksamen Kennzahlen ist in **Bild 2** dargestellt. Durch die differenzierte Erfassung direkt messbarer und indirekt kalkulierbarer Emissionen ermöglicht das Modell eine effiziente Erfassung und Nachverfolgung von Treibhausgasemissionen bis auf Prozessebene hinab.

Die Produktions-PCF werden aus den einzelnen Prozess-PCF aggregiert. Die Emissionserfassung im Bereich der Produktion erfolgt gemäß des Datenmodells durch Zuordnungen der potenziellen oder realen Emissionen in die auf Shopfloorebene teils direkt messtechnisch erfassbaren Parametern (Kategorie 1). Dabei wird für Parameter, die sich einer direkten Messung entziehen, beziehungsweise sich eine direkte Messung nicht mit

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-48 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

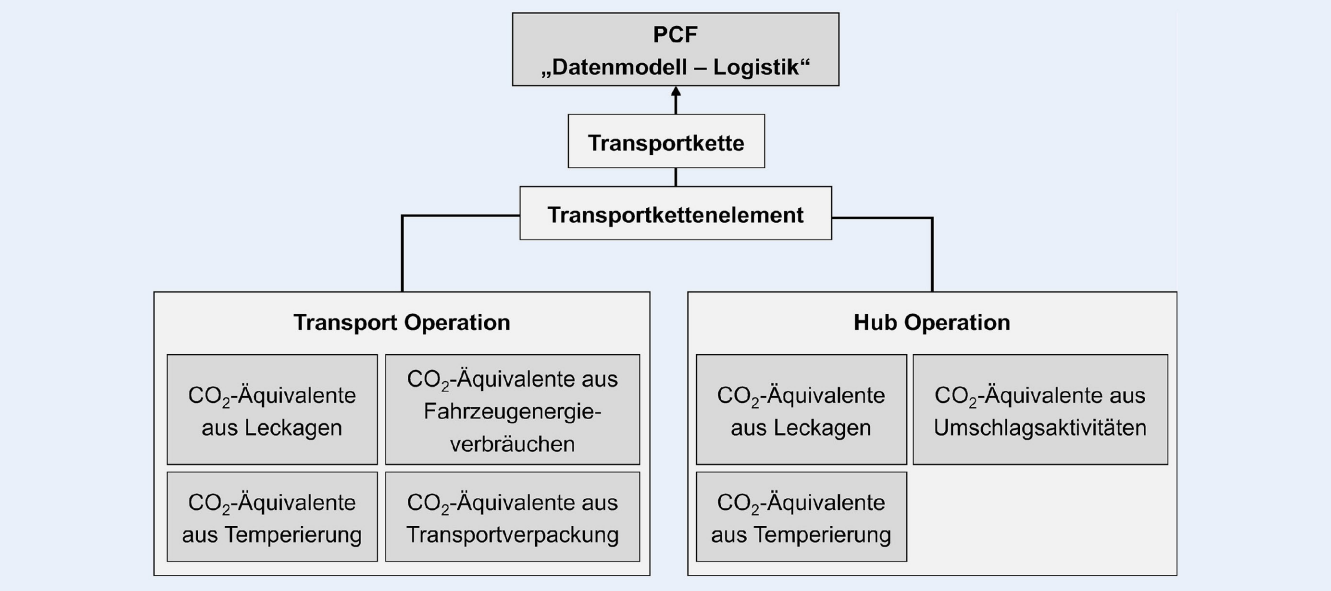

Bild 3. Struktur des PCF des Teilmodells „Datenmodell Logistik" für die Erfassung der Emissionen aus Logistikprozessen.
Grafik: Eigene Darstellung in Anlehnung an DIN EN ISO 14083:2023–11

einem ökonomisch und technisch vertretbaren Aufwand abbilden lässt, auf methodische Ansätze zurückgegriffen, die eine Approximation der Emissionen im Einklang mit vorherrschenden Standards und Richtlinien erlauben. Dies betrifft zuvorderst den Bereich der Gemeinemissionszuschläge auf die jeweiligen Prozess-PCF, deren Berechnung in für die Emissionskategorie angepassten Submodellen erfolgt und in Bild 2 unter Kategorie 2 vermerkt sind. Die Parameter der Kategorie 2 werden durch beigeordnete Submodelle berechnet, deren Funktionsweisenbeschreibung an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt wird.

- **Kategorie 1:** Direkt messbare Parameter
  - CO_2-Äquivalente Emissionen der Eingeflossenen Rohstoff
  - CO_2-Äquivalente Emissionen der verbrauchten Elektrizität
  - CO_2-Äquivalente Emissionen der verbrauchten Druckluft
  - CO_2-Äquivalente Emissionen der direkt verbrauchten Fossilen Energieträger
- **Kategorie 2:** Indirekt zu ermittelnde Parameter
  - CO_2-Äquivalente Emissionen aus Belegung von Anlage
  - CO_2-Äquivalente Emissionen aus Belegung von Gebäuden

Es zeigte sich im Rahmen der Recherchen und Befragungen mit den Projektpartnern seitens der Industrie, dass eine gravimetrische oder zeitbasierte Zuschlagszuordnung für jeden betrachten Prozess als am effizientesten im Kontext vorhandener Organisations- und Ablauforganisation angesehen wird. Die Prüfung bestehender Normen, Richtlinien und etablierten Emissionserfassungsverfahren hat ergeben, dass eine solch konzipierte Emissionserfassung im Einklang mit betrachteten Regelwerken steht. Die Wahl des Zuschlagverfahrens (gravimetrisch/zeitbasiert) muss für jeden Prozess individuell festgelegt werden und basiert auf Prognosedaten.

Neben der Erfassung der Emissionen, sieht das Datenmodell eine Bereisung der Emissionen vor, wodurch zielgerichtete emissionsbezogene Kostenanalysen der Wertschöpfungskette bis auf Prozessebene ermöglicht wird, können aufbauend darauf Optimierungsstrategien identifiziert und quantifiziert werden können, eine hinreichende Datengranularität, Güte und Konsistenz vorausgesetzt.

Die praktische Anwendung des „Datenmodells-Produktion" ermöglicht Unternehmen faktisch die effektive Analyse ihres Carbon Footprints und die Initiierung zielgerichteter Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Indem es detaillierte Daten über die Emissionen auf Prozessebene bereitstellt, unterstützt das Modell die fundierte Entscheidungsfindung hinsichtlich Nachhaltigkeitsstrategien. Das Datenmodell trägt somit signifikant zur Steigerung der Transparenz der direkten und indirekten Emissionen auf Prozessebene bei.

3.2 Datenmodell – Logistik

Neben den Emissionen aus Produktionsprozessen sind auch die Emissionen logistischer Prozesse für eine ganzheitliche Betrachtung essenziell. In Hinblick auf relevante Normen wurde die neu eingeführte DIN EN ISO 14083:2023–11 Norm, als eine konsolidierte Form bisheriger Normierungsbestreben zur Erfassung und Darstellung von Treibhausgasemissionen in der Logistik, identifiziert. Sie berücksichtigt in ihrer Methodik nicht nur direkte Emissionen aus Transportvorgängen, sondern auch indirekte Emissionen aus Umschlags- und Lagerprozessen sowie Leckagen von Kältemitteln. Hierfür erfasst die Norm sowohl Emissionen aus sogenannten Transportoperationen, bei denen Passagiere oder Waren von einem Fahrzeug von einem Ort an einen anderen transportiert werden, und sogenannten Huboperationen, bei welchen Passagieren oder Waren durch einen Hub transferiert werden. Als Hub wird dabei ein Ort verstanden, an welchem etwa Umschlagsprozesse von einem Fahrzeug auf ein anderes stattfinden. Dieser umfassende Ansatz ermöglicht eine genauere Abbildung der Treibhausgasemissionen entlang der gesamten Transportkette und ermöglicht dabei eine Vielzahl von Verkehrsträgern und Hilfsprozessen abzubilden. [18]

Die Anwendung dieser Norm im Kontext des „Datenmodells Logistik" zielt darauf ab, eine Methodik zu schaffen, die sowohl den aktuellen wissenschaftlichen Standards entspricht als auch

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-48 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

praktisch anwendbar ist. Das „Datenmodell Logistik“ ist in **Bild 3** dargestellt und greift hierfür den Aufbau und die Vorgaben der DIN EN ISO 14083:2023–11 auf und bietet Bausteine zur Abbildung komplexer Transportketten, bestehend aus beliebig vielen Transport- und Huboperationen. Im Rahmen dieser Operationen können sowohl Treibhausgasemissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe für den Betrieb von Fahrzeugen als auch Emissionen aus Energieaufwendungen für die Temperierung und Verpackung sowie Leckagen im Modell erfasst werden. Die Emissionen werden entlang der gesamten Transportkette einer Sendung gesammelt und aggregiert. So können besonders emissionsintensive Prozessschritte identifiziert und Maßnahmen für eine Optimierung ergriffen werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde eine Methodik zur echtzeitnahen Erfassung und Dokumentation von produktbezogenen Treibhausgasemissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette entwickelt. Die Anwendung der Verwaltungsschale als digitale Repräsentation von Assets ermöglicht eine durchgängige Weitergabe der Emissionsdaten über Unternehmensgrenzen hinweg, die eine ganzheitliche Betrachtung von Treibhausgasemissionen in komplexen Wertschöpfungsnetzwerken ermöglicht.

Ein wesentlicher Aspekt der Methodik ist die Berücksichtigung relevanter Normen und Standards für die Treibhausgasbilanzierung, womit eine hohe Anwendbarkeit in der industriellen Praxis sichergestellt wird. Die Methodik baut zudem auf bestehenden Initiativen im Rahmen der standardisierten Teilmodellentwicklung für die Verwaltungsschale auf und leistet einen bedeutenden Beitrag zur Weiterentwicklung der bestehenden Konzepte.

Bei der Konzeption der Methodik lag ein besonderes Augenmerk auf der Erweiterbarkeit und der Anpassungsfähigkeit des konzeptionellen Rahmens, um evolutionäre Entwicklungen, die sich aus technologischen Innovationen, marktinduzierten Anforderungsänderungen sowie fortschreitenden regulatorischen und rechtlichen Rahmenbedingungen ergeben, effektiv zu abbilden zu können.

Der vorgestellte Ansatz ermöglicht nicht nur eine echtzeitnahe Erfassung von Treibhausgasemissionen, sondern unterstützt auch die Prognose von Emissionsszenarien und deren Entwicklungen in Produktions- und Logistikprozessen. Darüber hinaus eröffnet die Methodik Perspektiven für eine gezielte, echtzeitnahe Steuerung und Optimierung von Produktions- und Logistikprozessen von Wertschöpfungsketten. Dies ermöglicht Unternehmen innerhalb komplexer Wertschöpfungsnetzwerken, auf Basis der ermittelten oder prognostizierten Emissionsdaten geeignete, quantifizierbare und verifizierbare Maßnahmen zur Emissionsreduktion zu implementieren und zu dokumentieren. Die Methodik fördert eine Transformation hin zu einer klimaneutraleren und nachhaltigeren Wirtschaftsweise in industriellen Wertschöpfungsnetzwerken.

Abschließend ist festzuhalten, dass erst die systematische Identifikation, Beschreibung und Klassifikation von Industrieanforderungen sowie die systematische Analyse relevanter Normen und Richtlinien deren Integration in ein integriertes, ganzheitliches Emissionserfassungskonzept ermöglichten.

In folgenden Forschungsarbeiten sollte die entwickelte Methodik im Rahmen industrieller Praxistests evaluiert und weiter verfeinert werden. Auch die darauf aufbauenden Ansätze zur wertschöpfungskettenweiten Optimierung von Produktions- und Logistikprozessen erfordern weitere Detaillierung sowie praktische Validierung.

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten die entwickelte Methodik durch industrielle Praxistests evaluieren und weiter verfeinern. Zudem bedürfen die darauf basierenden Konzepte zur Optimierung von Produktions- und Logistikprozessen entlang der gesamten Wertschöpfungskette einer zusätzlichen Detaillierung und praktischen Validierung.

FÖRDERHINWEIS

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projektes „FILPCO2“ durchgeführt und vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg finanziell unterstützt.

Literatur

[1] Flaute, M.; Reuschel, S.; Stöver, B.: Volkswirtschaftliche Folgekosten durch Klimawandel: Szenarioanalyse bis 2050 – Studie im Rahmen des Projektes Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland. Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) mbH, Dez. 2022

[2] Endenergieverbrauch 2022. Zugriff am 7. März 2024. Internet: https://www.umweltbundesamt.de/bild/endenergieverbrauch-2022

[3] Khan, A. A; Abonyi, J.: Information sharing in supply chains – Interoperability in an era of circular economy. Cleaner Logistics and Supply Chain, Bd. 5, S. 100074, Dez. 2022, DOI: https://doi.org 10.1016/j.clscn.2022.100074

[4] Freichel, S.; Rütten, P.; Wörtge, J.: Challenges of supply chain visibility in distribution logistics: a literature review. EV, Bd. 35, Nr. 2, S. 453–466, 2022, DOI: https://doi.org/10.51680/ev.35.2.1

[5] Alsaadi, N.: Modeling and Analysis of Industry 4.0 Adoption Challenges in the Manufacturing Industry“, Processes, Bd. 10, Nr. 10, S. 2150, Okt. 2022, DOI: https://doi.org/10.3390/pr10102150

[6] Grüner, S.; Neidig, J.; Orzelski, A.; Pollmeier, S.: ASSET ADMINISTRATION SHELL READING GUIDE. Industrial Digital Twin Association e.V., Nov. 2022

[7] AAS Spezifikationen Archiv. Zugriff am 12. März 2024. Internet: https://industrialdigitaltwin.org/content-hub/aasspecifications

[8] Teilmodelle – Industrial Digital Twin Association e. V. Zugriff am 12. März 2024. Internet: https://industrialdigitaltwin.org/content-hub/teilmodelle

[9] Industrial Digital Twin Association e.V.: IDTA 02023–0–9 Carbon Footprint Submodel Template of the Asset Administration Shell v0.9, Nov. 2023.

[10] European Commission: Press Release: New proposals to make sustainable products the norm. Zugriff am 12. März 2024. Internet: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_2013

[11] DIN EN ISO 14064–1:2019–06, Treibhausgase – Teil 1: Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und Entzug von Treibhausgasen auf Organisationsebene (ISO_14064–1:2018); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_14064–1:2018. Beuth Verlag GmbH. DOI: https://dx.doi.org/10.31030/2863919

[12] DIN EN ISO 14067:2019–02, Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten_- Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO_14067:2018); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_14067:2018, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2851769.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-48 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

[13] PAS 2050:2011: Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. British Standards Institution, 2011. Zugriff am 18. März 2024. Internet: https://www.beuth.de/de/norm/bs-pas-2050/147783269
[14] Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard – Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard, World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2011. Zugriff am 18. März 2024. Internet: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporing-Standard_041613_2.pdf
[15] Universität Potsdam, S. Lewandowski, A. Ullrich, und N. Gronau, Normen zur Berechnung des CO_2-Fußabdrucks", I40M, Bd. 2021, Nr. 4, S. 17–20, Aug. 2021. DOI: https://doi.org/10.30844/I40M_21–4_S17–20
[16] DIN EN 16258:2013–03, Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr); Deutsche Fassung EN_16258:2012. Beuth Verlag GmbH. DOI: https://dx.doi.org/10.31030/1894795
[17] Smart Freight Centre. Zugriff am 18. März 2024. Internet: https://www.smartfreightcentre.org/en/our-programs/global-logistics-emissions-council/calculate-report-glec-framework/
[18] DIN EN ISO 14083:2023–11, Treibhausgase – Quantifizierung und Berichterstattung über Treibhausgasemissionen von Transportvorgängen (ISO_14083:2023); Deutsche Fassung EN_ISO_14083:2023. Beuth Verlag GmbH. DOI: https://dx.doi.org/10.31030/3447231

Marco Maier, M.Sc.
Tel. +49 711 685-61876
marco.maier@iff.uni-stuttgart.de
Foto: IFF

Prof. Onorific Dipl.-Ing. Jörg Siegert
Tel. +49 711 685-61875
joerg.siegert@iff.uni-stuttgart.de

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF
Universität Stuttgart
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.iff.uni-stuttgart.de

Christof Schillinger, B.Sc.
Tel. +49 7441 86849 00
christof.schillinger@campus-schwarzwald.de

Verfahrens- und Umwelttechnik
Centrum für Digitalisierung, Führung
und Nachhaltigkeit Schwarzwald gGmbH
Herzog-Eberhard-Str. 56, 72250 Freudenstadt

Maximilian Hentsch, M.Eng.
maximilian.hentsch@reutlingen-university.de

Prof. Dr. techn. Daniel Palm

ESB Business School
Hochschule Reutlingen
Alteburgstr. 150, 72762 Reutlingen
www.esb-business-school.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-48 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY