

„Ulrich Jumar, Christian Diedrich (Hrsg.):  
EKA 2024 - Entwurf komplexer Automatisierungssysteme, 18. Fachtagung“

## Praktikable Ermittlung des produktbezogenen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks mithilfe grüner Digitaler Energiezwillinge

Florian Balduf<sup>1</sup>, Zai Müller-Zhang<sup>2</sup>, Thomas Kuhn<sup>3</sup>

**Keywords:** Digitale Zwillinge, CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, Nachhaltigkeit, Verwaltungsschale.

### Abstract

In dieser Veröffentlichung führen wir grüne Digitale Energiezwillinge (gDEZ) als einen vielversprechenden Ansatz zur Ermittlung des produktbezogenen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks in der Fertigungsindustrie gemäß etablierten Standards ein. Angesichts der zunehmenden Dringlichkeit, Treibhausgasemissionen zu reduzieren, ist es entscheidend, effektive Methoden zur Bewertung und Optimierung von Produktionsprozessen zu entwickeln. Der Einsatz von digitalen Zwillingen zur effizienten Ressourcennutzung steht im Zentrum unseres Ansatzes, mit dem Ziel, die Treibhausgasemissionen der hergestellten Produkte zu ermitteln und Potenziale für deren Reduzierung zu erschließen. Der gDEZ-Ansatz integriert Datenmodelle mit den Aspekten Ressource, Produkt und Prozess und Berechnungsmodelle mit unterschiedlichen Detailgraden, um eine praktikable Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks auf Produktions- und Produktebene zu ermöglichen. Der Artikel skizziert das Datenmodell der gDEZ, zeigt Anwendungsszenarien sowie das Konzept der Berechnungsmodelle auf und diskutiert zukünftige Entwicklungen in diesem Bereich.

### 1 Einleitung

Die globalen Klimaveränderungen haben ein Umdenken in der Nutzung von Produkt- und Bestandteilen innerhalb der Kreislaufwirtschaft sowie in der Erfassung umweltbezogener Kosten für Produkte, wie beispielsweise Carbon Credits, angestoßen [Fi23]. Dies stellt eine Herausforderung für die Wettbewerbsfähigkeit dar, da Unternehmen verpflichtet sind, Produktinformationen über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu dokumentieren. Die Potenziale der Industrie 4.0, insbesondere das Konzept der servicebasierten Architekturen, können hierbei einen erheblichen Beitrag leisten [TA17, KSA20].

<sup>1</sup> Fraunhofer IESE, Embedded Systems Engineering, Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern, [florian.balduf@iese.fraunhofer.de](mailto:florian.balduf@iese.fraunhofer.de), <https://orcid.org/0000-0002-3367-1690>

<sup>2</sup> Fraunhofer IESE, Virtual Engineering, Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern, [zai.mueller-zhang@iese.fraunhofer.de](mailto:zai.mueller-zhang@iese.fraunhofer.de), <https://orcid.org/0000-0002-0228-943X>

<sup>3</sup> Fraunhofer IESE, Embedded Systems, Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern, [thomas.kuhn@iese.fraunhofer.de](mailto:thomas.kuhn@iese.fraunhofer.de), <https://orcid.org/0000-0001-9677-9992>

Ein zentrales Anliegen, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU), besteht in der praktikablen Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks auf Basis etablierter Berechnungsstandards. Aktuell greifen KMU oft auf individuelle Lösungen z.B. unter Verwendung von MS Excel zurück, was zu einer Fragmentierung und Inkonsistenz der Daten führen kann. Die Einführung einer standardisierten Datenablage könnte nicht nur die Berechnung der THG-Emissionen vereinfachen, sondern auch in anderen Bereichen bedeutende Vorteile bieten. Dies würde zu einem einheitlichen Vorgehen führen und es ermöglichen, Informationen vergleichbar zu machen und über die Wertschöpfungskette hinweg zu verwenden. In diesem Artikel präsentieren wir einen praxisnahen Ansatz zur Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks. Der Ansatz basiert auf grünen Digitalen Energiezwillingen, welche Daten und Berechnungsmodelle beinhalten.

Der Aufbau des Artikels gestaltet sich wie folgt. Nach der Einleitung in Abschnitt I führt Abschnitt II in den Hintergrund des digitalen Zwillings und der Verwaltungsschale ein. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf bisherigen Arbeiten im Bereich Product Carbon Footprint (PCF), und verwandte Arbeiten im Bereich Industrie 4.0 und Nachhaltigkeit werden untersucht. In Abschnitt III wird die Problemstellung beleuchtet und aufgezeigt, warum die praktikable Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks viele Unternehmen vor große Herausforderungen stellt. Abschnitt IV stellt unser Lösungskonzept vor und erläutert, warum die Datenmodelle der gDEZ ein Schritt hin zur praxistauglichen Ermittlung produktbezogener Treibhausgasemissionen sind. In Abschnitt VI wird der Artikel zusammengefasst und zukünftige Arbeiten werden diskutiert.

## 2 Stand der Technik

In der aktuellen Forschung und industriellen Praxis haben digitale Zwillinge eine zentrale Bedeutung erlangt, insbesondere in Bezug auf Nachhaltigkeitsmodelle und deren Anwendung in der Fertigungsindustrie. Die Arbeiten von Sigh et al. und Jabbour et al. haben gezeigt, dass digitale Zwillinge die Resilienz von Lieferketten signifikant verbessern und zur Nachhaltigkeit der Produktionsprozesse beitragen können. [Si23] [Ja20]

Die Nutzung von Big Data und diskreten Ereignissimulationsmodellen, wie von Chávez et al. vorgestellt, ermöglicht eine detaillierte Bewertung und Optimierung von Nachhaltigkeitsleistungen in Fertigungssystemen [Ch22]. Edrisi et al. betonen die Fähigkeit digitaler Zwillinge, umfangreiche Datenmengen zu analysieren und Prognosen über Nachhaltigkeitsindikatoren zu erstellen, was besonders bei zunehmender Anzahl beteiligter Unternehmen und Datenmengen von Vorteil ist [EA23]. Die Integration dieser Technologien ermöglicht eine präzisere Überwachung und Steuerung von Umweltauswirkungen auf Produktebene, was für die Einhaltung von Nachhaltigkeitszielen und die Implementierung von Kreislaufwirtschaftskonzepten unerlässlich ist.

---

Die Verwaltungsschale (englisch: Asset Administration Shell, AAS) bietet eine technologische Grundlage für den Austausch Asset-zentrierter Informationen über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Sie wird durch die Industrie 4.0 Initiative gefördert und zielt darauf ab, Interoperabilität durch standardisierte Datenbeschreibungen zu gewährleisten. Die Möglichkeit, mithilfe der AAS PCF-Informationen auszutauschen und zu optimieren, wie durch die PCF-Submodellvorlagen unterstützt, trägt wesentlich zur Transparenz und Nachvollziehbarkeit bei der Berechnung von und der Berichterstattung zu CO<sub>2</sub>-Fußabdrücken bei.

Verschiedene Standards wie ISO 14044, ISO 14067 und das Greenhouse Gas Protocol haben das Ziel, eine Anleitung zur Berechnung der produktbezogenen THG-Emissionen bereitzustellen und dadurch einen internationalen Standard zu etablieren. Diese Standards bieten eine wichtige Orientierungshilfe für Unternehmen, erfordern jedoch eine spezifische Anpassung an die betrieblichen Gegebenheiten. Das GHG Protocol und die Catena-X PCF-Regeln bieten Frameworks für eine ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus von Produkten. Die derzeitigen Standards liefern jedoch keine detaillierten Informationen, wie der Beitrag der THG-Emissionen der Produktion zum PCF einzelner Produkte ermittelt und zugeordnet werden soll. Unser Ansatz zielt darauf ab, diese Lücke zu schließen, indem wir Aufwendungen, die nicht direkt einem einzelnen Produkt zugeordnet werden können, identifizieren und Berechnungsmodelle entwickeln, wie diese sinnvoll auf das Produkt umgelegt werden können. Dies ermöglicht eine einfache, praxisnahe und dennoch standardkonforme Zuordnung von THG-Emissionen und unterstützt Unternehmen bei der Ermittlung des produktbezogenen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks, und dadurch wiederum die Erreichung der Nachhaltigkeitsziele

### 3 Lösungskonzept

In diesem Abschnitt führen wir die Datenmodelle und Berechnungsmodelle der grünen Digitalen Energiezwillinge ein. Die **Datenmodelle** beinhalten die Aktivitätsdaten für die Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks. Die Genauigkeit der Berechnungsmodelle basiert auf dem Digitalisierungsgrad des Produktionssystems. Das bedeutet, dass für eine gut digitalisierte Produktion, in der eine Vielzahl an Aktivitätsdaten digitalisiert ist, ein Berechnungsmodell mit höherer Genauigkeit gewählt werden kann. Andernfalls wird ein Modell mit niedrigerer Genauigkeit ausgewählt.

Mit dem gDEZ-Ansatz wollen wir einen Schritt weiter gehen als bisherige Vorhaben und eine praxistaugliche Berechnung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks auf Produktions- und Produktebene ermöglichen. Hierfür werden die verschiedenen Quellen von Treibhausgasen wie z.B. energiebezogene Emissionen oder Emissionen durch den Transport identifiziert und mithilfe des später beschriebenen Whitebox-Ansatz-Hotspots identifiziert (Datenpunkte, die eine hohe Relevanz für die Berechnung der THG-Emissionen haben). Zur Umsetzung setzen wir auf die standardisierten Datenmodelle der Verwaltungsschale (Asset Administration Shells, AAS) [In22]. Hierdurch ist ein

Datenaustausch entlang der digitalen Lieferkette gegeben und die Datenmodelle können in Form von Teilmodellen wiederverwendet werden. Die Datenmodelle ermöglichen zudem eine Zuordnung der Informationen zu den jeweiligen Verantwortungsbereichen. Es findet also eine Unterscheidung der TGH-Emissionen statt, die direkt oder indirekt der betrachteten Produktion zuzuordnen sind (vergl. Scope 1 und Scope 2) oder die der vor- bzw. nachgelagerten Lieferkette zugeordnet werden (Scope 3).

Der AAS-Standard gewährleistet die Interoperabilität der Datenmodelle und ermöglicht den Austausch von Datenmodellen zwischen verschiedenen Organisationen. Auf diese Weise kann ein nahtloser Datenaustausch innerhalb digitaler Lieferketten durch die Einbettung der PCF-Datenmodelle in die Digitalen Produktpässe (DPP) erleichtert werden. Um öffentliche und nichtöffentliche Informationen zu trennen, gibt es verschiedene Sichten auf die Datenmodelle der gDEZ. Externe Sichten enthalten öffentlich zugänglich Informationen wie aggregierte Daten zum CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und Recyclingdaten, welche zu einem späteren Zeitpunkt in Digitale Produktpässe (DPP) einfließen sollen. Interne Sichten enthalten Informationen über spezifische Parameter und Prozessinformationen auf Produktebene, die aus Wettbewerbsgründen nicht geteilt werden sollen. Die Europäische Kommission befürwortet Digitale Produktpässe im "Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft", wo sie als innovative Lösungen positioniert sind, um kreislaufwirtschaftliche Praktiken zu verbessern [EC20]. In dieser Arbeit legen wir den Fokus auf die gDEZ-Datenmodelle und führen ferner Anwendungsfälle sowie Berechnungsmodelle ein. Um die Logik hinter dem Datenmodell zu beschreiben und zu zeigen, dass die vorgeschlagenen Eigenschaften bestimmte Zwecke erfüllen, präsentieren wir nachfolgend zwei Anwendungsfälle, die wir zusammen mit unseren Industriepartnern identifiziert haben.

**Anwendungsfall 1:** Der Hersteller muss PCF-Daten an den Originalausrüstungshersteller (OEM) offenlegen. In diesem Anwendungsfall liegt der Fokus auf der Verbesserung von Transparenz und Nachhaltigkeit innerhalb der Lieferkette durch die vorgeschriebene Weitergabe des PCF von Herstellern auf der Zuliefererebene an Originalausrüstungshersteller (OEM). Dieser Anwendungsfall hebt die entscheidende Rolle produktspezifischer Daten guter Qualität hervor. Dies ist ein Schritt zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen und beantwortet die steigende Nachfrage nach Umweltverantwortung in der Industrie. Das Ziel dieses Anwendungsfalles ist es, auf die Notwendigkeit einer besseren Methode zur Erfassung und gemeinsamen Nutzung dieser Daten in einem gemeinsamen Format hinzuweisen, insbesondere im Hinblick auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Materialien und Komponenten. Dies ermöglicht es OEMs, fundierte Entscheidungen zu treffen, die die Umweltauswirkungen ihrer Produkte verringern. Der Ansatz unterstützt breitere Nachhaltigkeitsinitiativen, wie die Reduzierung von Treibhausgasemissionen, die Optimierung der Ressourcennutzung und die Förderung der Kreislaufwirtschaft. Darüber hinaus reagiert dieser Anwendungsfall geschickt auf die Anforderungen neu entstehender Nachhaltigkeitsvorschriften, wie sie beispielsweise

---

durch den Green Deal der Europäischen Union und die Richtlinie zur Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen (CSRD) veranschaulicht werden.

**Anwendungsfall 2:** Optimierung des Produktionsprozesses für Energieeffizienz. Dies zielt auf die Verbesserung der Energieeffizienz in Produktionsprozessen durch Analyse und Optimierung des Energieverbrauchs, unterstützt durch gDEZ. Dieser Anwendungsfall unterstreicht die Bedeutung eines praktischen Ansatzes zur Datenaggregation als grundlegenden Schritt zur Erzielung messbarer Energieeinsparungen und Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks in Produktionsprozessen. Wenn dies erreicht wird, können Ineffizienzen identifiziert und angegangen werden, was den Energieverbrauch und den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Produktionsbetrieben reduziert. Dieser Anwendungsfall ist besonders relevant als Antwort auf steigende Energiekosten, Nachhaltigkeitsvorschriften und unternehmerische Umweltverpflichtungen.

Um den PCF auf Produktebene angemessen zu bestimmen, reicht es nicht aus, nur die Informationen des Produkts selbst zu bewerten, wie beispielsweise Gewicht und Abmessungen. Auch die Aktivitätsdaten von Ressourcen und Prozessen sind relevant. In einer Fabrik werden Fertigungsprozesse von Ressourcen durchgeführt, die einen Mehrwert für die Produkte schaffen. Wir berücksichtigen auch die Energie, die von den Ressourcen verbraucht wird, um die Produkte in der PCF-Berechnung auf Produktebene zu verarbeiten. Darüber hinaus sind zur Bestimmung des Energiebedarfs eines Produkts auch relevante Prozessinformationen erforderlich. Daher ist es notwendig, relevante Informationen aus Produkt, Prozess und Ressource (PPR) [PSB13] in die Datenmodelle zu integrieren. Die folgenden Eigenschaften werden weiter iteriert und dienen als initialer Vorschlag, den wir mit unseren Industriepartnern validieren konnten. Um die Datenstruktur der Informationen, die durch die gDEZ dargestellt werden, zu identifizieren, muss das Szenario klar definiert sein. Die Datenmodelle beschreiben Fabrikinformationen, wie die verfügbaren Ressourcen, und wie sie mit dem Produkt, den Prozessen und seiner Umgebung interagieren.

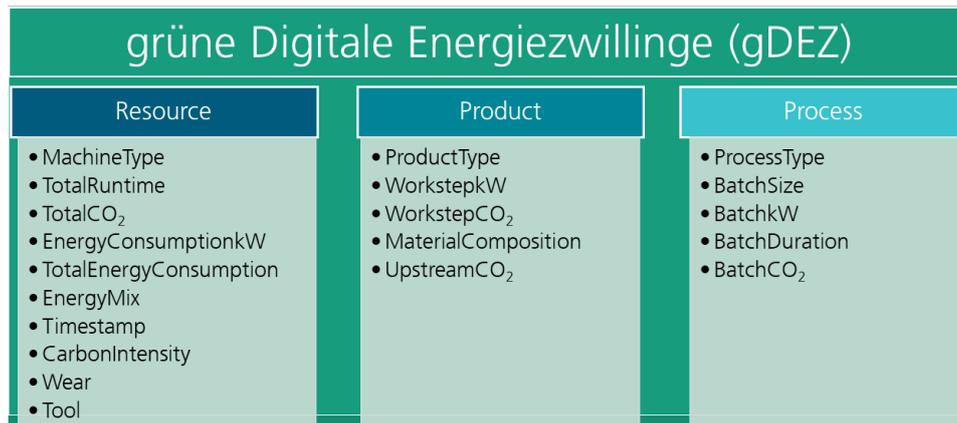


Abb. 1: Vereinfachte Darstellung des gDEZ-Datenmodells

Die Informationen des gDEZ-Ressourcenaspekts bieten einen umfassenden Einblick in die operativen Aspekte von Produktionsanlagen. Sie umfassen die folgenden Eigenschaften:

- **MachineType:** Beschreibt den Typ der Maschine oder Ressource.
- **TotalRuntime:** Gibt die Gesamtbetriebszeit der Ressource an.
- **TotalCO<sub>2</sub>:** Zeigt die Gesamtemissionen von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) der Ressource an.
- **EnergyConsumptionkW:** Stellt den Energieverbrauch der Ressource in Kilowatt (kW) dar.
- **TotalEnergyConsumption:** Gibt den Gesamtenergieverbrauch der Ressource an.
- **EnergyMix:** Beschreibt die Zusammensetzung des Energiemixes, der von der Ressource verwendet wird.
- **Timestamp:** Gibt den Zeitpunkt an, zu dem die Daten erfasst wurden.
- **CarbonIntensity:** Stellt die spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionsintensität der Ressource dar.
- **Wear:** Beschreibt den Verschleißzustand der Ressource.
- **Tool:** Gibt an, ob die Ressource ein Werkzeug oder eine bestimmte Ausrüstung verwendet.

Diese Daten ermöglichen eine detaillierte Analyse des Energieverbrauchs, der damit verbundenen THG-Emissionen und der Betriebszeiten einzelner Ressourcen. Durch die Bereitstellung und Übergabe dieser Informationen können Hersteller Optimierungspotenziale erarbeiten, um die Energieeffizienz zu steigern und den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Produktion ihrer Produkte zu verringern. Darüber hinaus ermöglicht die Verfügbarkeit von Zeitstempeln eine zeitliche Analyse des Energieverbrauchs, was wiederum eine bessere Planung und Steuerung der Produktionsabläufe unterstützt.

---

Der Produktaspekt des gDEZ bietet eine detaillierte Analyse der Produkte in Bezug auf deren Herstellung und Zusammensetzung. Hier sind die zugehörigen Eigenschaften:

- **ProductType:** Beschreibt den Typ oder die Kategorie des Produkts.
- **WorkstepkW:** Gibt den Energieverbrauch des Arbeitsschritts für die Herstellung des Produkts in Kilowatt (kW) an.
- **WorkstepCO2:** Zeigt die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Arbeitsschritts für die Herstellung des Produkts an.
- **MaterialComposition:** Beschreibt die Zusammensetzung der Materialien, aus denen das Produkt hergestellt ist.
- **UpstreamCO2:** Gibt die CO<sub>2</sub>-Emissionen an, die bei der Herstellung der Vorprodukte oder bei vorangehenden Prozessen entstehen.

Diese Informationen ermöglichen eine detaillierte Analyse des Energieverbrauchs, der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Materialzusammensetzung jedes Produkts.

Der Prozessaspekt des gDEZ liefert umfassende Einblicke in die verschiedenen Fertigungsprozesse, die zur Herstellung von Produkten verwendet werden. Hier sind die entsprechenden Eigenschaften:

- **ProcessType:** Beschreibt den Typ oder die Art des Fertigungsprozesses.
- **BatchSize:** Gibt die Anzahl der Einheiten an, die in einem Fertigungszyklus verarbeitet werden.
- **BatchkW:** Zeigt den Energieverbrauch der Charge während des Fertigungsprozesses in Kilowatt (kW) an.
- **BatchDuration:** Gibt die Dauer des Fertigungszyklus oder der Charge an.
- **BatchCO2:** Zeigt die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen während des Fertigungsprozesses oder der Charge an.

Für eine praktikable **Berechnung** des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von Produktionsprozessen schlagen wir einen mehrstufigen Ansatz vor. Hiermit wollen die unterschiedlichen Fertigungsumgebungen, einschließlich der unterschiedlichen Grade der Digitalisierung und Integration. Um diesen unterschiedlichen Voraussetzungen zu begegnen und eine praktikable Anwendbarkeit sicherzustellen, grenzen wir mindestens drei unterschiedliche detaillierte Berechnungsmodelle voneinander ab, deren Konzepte wir folgend einführen.

Das **Direktemissionsmodell** konzentriert sich darauf, direkte Emissionen aus Fertigungsprozessen mithilfe von Aktivitätsdaten zu quantifizieren. Durch die Konzentration auf unmittelbare Emissionsquellen innerhalb der Produktion ermöglicht dieses Modell die Berechnung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks pro Batch (*BatchCO2*), durch das Nutzen des Energieverbrauchs der Ressource (*EnergyConsumptionkW*) und den Emissionsfaktoren im Strommix (*CarbonIntensity*).

Das **erweiterte Modell** integriert zu den direkten Emissionen, die Dimensionen von Existenz und Verschleiß. Dieser Ansatz berücksichtigt die Lebenszyklusauswirkungen von Geräten und berücksichtigt die Emissionen im Zusammenhang mit Herstellung,

Wartung und Stilllegung oder Ersatz. Durch die Berücksichtigung dieser Faktoren bietet das Modell eine genauere Sicht auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der erzeugten Produkte.

Das **umfassende Modell** integriert zu dem erweiterten Modell, zusätzlich die Informationen aus Vorprozessen. Dies erstreckt sich über die Grenzen der Fabrik hinaus, um die Emissionen von Materialien und Komponenten zu erfassen, die in der Fertigung verwendet werden. Dieses Modell nutzt Lieferketten-Daten, um Emissionen aus Rohstoffgewinnung, Transport und Verarbeitung einzubeziehen.

## 4 Ausblick

In dieser Arbeit haben wir die gDEZ-Datenmodelle vorgestellt, die zur Modellierung der erforderlichen Aktivitätsdaten für die PCF-Berechnung benötigt werden. Für die Datenmodelle haben wir illustriert, welche Aktivitätsdaten notwendig sind und wie sie in den Datenmodellen dargestellt werden. Um die Datenqualität zu gewährleisten, sollten entsprechende Datenquellen integriert werden, um vernetzte Daten für die Eigenschaften in den Datenmodellen bereitzustellen. In einem weiteren Schritt wollen wir, basierend auf den gDEZ-Datenmodellen, unterschiedlich genaue Berechnungsmodelle zur Verfügung stellen. In der Praxis können Hersteller ein geeignetes Berechnungsmodell basierend auf dem Digitalisierungsgrad ihres Produktionssystems auswählen. Dies vermeidet unnötige Investitionen in die Digitalisierung und Aufrüstung des Produktionssystems. Die Anwendung der gDEZ-Modelle auf mehrere Produktionsschritte entlang einer Wertschöpfungskette gewährleistet konsistente PCF-Berechnungsergebnisse.

Die zukünftigen Arbeiten umfassen mehrere Aspekte. Zunächst werden wir die zweiten und dritten Berechnungsmodelle um Gleichungen erweitern, um die Berechnung zu konkretisieren. Gleichzeitig werden wir die PCF-Berechnung unter Berücksichtigung der Gemeinkosten wie Personalkosten erweitern, die nicht direkt einem einzelnen Produkt zugeordnet werden können. Zweitens werden wir das Berechnungsmodell um ein White-Box-Modell erweitern. Das White-Box-Modell berücksichtigt einen umfassenden Satz von Aktivitätsdaten für die Berechnung. Das White-Box-Modell hat daher eine hohe Genauigkeit. Allerdings ist die Implementierung eines White-Box-Modells in der Praxis meist aufgrund des begrenzten Digitalisierungsgrades eines Produktionssystems nicht möglich. Der Zweck des White-Box-Modells ist es, den Fehlerbereich der gDEZ-Berechnungsmodelle zu evaluieren. Wir werden eine Reihe von Experimenten einrichten, um die Fehler zu bewerten, indem wir die Berechnungsergebnisse des White-Box-Modells mit den bisherigen Berechnungsmodellen vergleichen. Bei den Berechnungsmodellen werden wir bestimmte Parameter weglassen oder sie durch Daten geringerer Qualität ersetzen und die Berechnungsergebnisse mit dem White-Box-Modell vergleichen. Basierend auf den Ergebnissen können wir feststellen, welche Parameter für die PCF-Berechnung relevant sind und mit hoher Genauigkeit bereitgestellt werden müssen.

Drittens werden wir die aktuelle Bewertung mit dem White-Box-Modell erweitern, um die relevanten Parameter zu identifizieren, die eine hohe Genauigkeit erfordern, sowie die Parameter, die weggelassen oder mit niedriger Genauigkeit bereitgestellt werden können.

Das White-Box-Modell kombiniert alle verfügbaren Informationen und dient als Baseline, um die Genauigkeit der Berechnungsmodelle festzustellen. Deshalb enthält das White-Box-Modell auch Informationen, die nur theoretisch verfügbar sind. Da es sehr aufwendig ist ein vollständiges White-Box-Modell aufzubauen, führen wir effiziente Berechnungsmodelle ein. Wir führen Metriken ein, um die Abweichungen zwischen den realen Berechnungsmodellen (White-Box-Modellen) und den idealisierten Berechnungsmodellen zu messen. Diese Metriken ermöglichen es, CO<sub>2</sub>-Hotspots im Produktionsprozess zu identifizieren und zu bestimmen, welche Datenpunkte präzise gemessen und integriert werden müssen. Dies ist besonders relevant für die Identifikation von Bereichen, in denen geschätzte Werte ausreichend sind, also das Modell vereinfacht werden kann. Hierdurch wollen wir Berechnungsmodelle erstellen, die genau genug und gleichzeitig praktikabel sind. Bei unserem Praxispartner wollen wir die praktische Anwendbarkeit und Effektivität unserer Modelle im Kontext einer Pumpenproduktion evaluieren.

## 5 Literaturverzeichnis

- [Ch22] Chávez, C. A. G.; Barring, M.; Frantzén, M.; Annepavar, A.; Gopalakrishnan, D.; Johansson, B.: Achieving Sustainable Manufacturing by Embedding Sustainability KPIs in Digital Twins. In: 2022 Winter Simulation Conference (WSC), 2022.
- [EA23] Edrisi, F.; Azari, M. S.: Digital Twin for Sustainability Assessment and Policy Evaluation: A Systematic Literature Review. In: 2023 IEEE/ACM 7th International Workshop on Green And Sustainable Software (GREENS), 2023.
- [EC20] European Commission: Digital Product Passport: Facilitating the Circular Economy within the European Union, 2020. Verfügbar unter: [[https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/digital\\_product\\_passport.pdf](https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/digital_product_passport.pdf)] Zugriff am 13. April 2024.
- [Fi23] Fischer, K.: Kapitel 15. Globalisierung: Globale Warenketten und Arbeitsteilung. In (Görg, C., Hrsg.): APCC Special Report: Strukturen für ein klimafreundliches Leben. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2023.
- [In22] Plattform Industrie 4.0: Details of the Asset Administration Shell: Part 1 - The Exchange of Information between Partners in the Value Chain of Industrie 4.0 (Version 3.0rc02). Plattform Industrie 4.0, 2022.
- [PSB13] J. Pfrommer, M. Schleipen und J. Beyerer, "PPRS: Produktionskompetenzen und ihre Beziehung zu Produkt, Prozess und Ressource," in International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Cagliari, 2013.

- [Ja20] Jabbour, C. J. C.; Fiorini, P. D. C.; Ndubisi, N. O.; Queiroz, M. M.; Piato, É. L.: Digitally-enabled sustainable supply chains in the 21st century: A review and a research agenda. In: *Science of the Total Environment*, Bd. 725, Art. Nr. 138177, 2020.
- [KSA20] Kuhn, T.; Schnicke, F.; Antonino, P. O.: Service-based Architectures in Production Systems: Challenges, Solutions & Experiences. In: *2020 ITU Kaleidoscope: Industry-Driven Digital Transformation (ITU K)*. IEEE, S. 1-7, Dezember 2020.
- [Si23] Singh, G.; Singh, S.; Daultani, Y.; Chouhan, M.: Measuring the influence of digital twins on the sustainability of manufacturing supply chain: A mediating role of supply chain resilience and performance. In: *Computers and Industrial Engineering*, Bd. 186, Art. Nr. 109711, 2023.
- [TA17] Tantik, E.; Anderl, R.: Potentials of the Asset Administration Shell of Industrie 4.0 for Service-Oriented Business Models. In: *Procedia CIRP*, Bd. 64, S. 363-368, 2017.