Integration des CO_2-Fußabdrucks von Produkten in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling

Sven Winter

Schriftenreihe PLCM
Band 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

PRODUCT LIFE CYCLE MANAGEMENT

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. habil. Benjamin Schleich

Integration des CO_2-Fußabdrucks von Produkten in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling

vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Sven Winter, M.Sc.

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich

Tag der Einreichung: 30.09.2024

Tag der mündlichen Prüfung: 05.02.2025

Darmstadt 2025

Winter, Sven: Integration des CO_2-Fußabdrucks von Produkten in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt,

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2025

URL: https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/29530

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-295303

Tag der mündlichen Prüfung: 05.02.2025

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

Vorwort des Herausgebers

Der Berücksichtigung der ökologischen Folgen von Produktion, Betrieb und End-of-Life-Strategien kommt bei der Entwicklung technischer Produkte und Systeme angesichts der immer stärker spürbaren Folgen des Klimawandels eine elementare Rolle zu. Der CO_2-Fußabdruck hat sich in diesem Zusammenhang als Metrik zur Bewertung dieser ökologischen Folgen etabliert, ist jedoch je nach Berechnungsmethode u. a. aufgrund der Einbindung von Schätzwerten großen Unsicherheiten unterworfen.

Motiviert hierdurch widmet sich die vorliegende Dissertation von Herrn Winter mit dem Titel „Integration des CO_2-Fußabdrucks von Produkten in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling“ der Erarbeitung eines Konzepts, das die Nutzung verschiedener Datenquellen bei der Berechnung des CO_2-Fußabdrucks entlang der gesamten Produktentstehung erlaubt, sodass dessen Unsicherheiten reduziert und seine Aussagekraft erhöht wird. Im Rahmen des vorgestellten Konzepts wird der CO_2-Fußabdruck in der Phase der virtuellen Produktentwicklung durch die Einbeziehung von Sekundärdaten angereichert und systematisch in den Digitalen Master integriert, während er in der anschließenden Herstellungs- und Betriebsphase durch Primärdaten ergänzt und in den Digitalen Zwilling überführt wird. Daneben sieht das vorgestellte Konzept ein begleitendes Qualitätsmanagement vor, das auf einer Kennzahl zur Bewertung der Aussagekraft des vorliegenden CO_2-Fußabdrucks beruht. Ergänzt wird das Gesamtkonzept zudem durch einen Datenprovenienzgraph, der eine Optimierungsgrundlage zur Verbesserung des CO_2-Fußabdrucks bildet und ebenso Informationslücken aufzeigt.

Als Ergebnis der Arbeit liegen ein Konzept zur Integration des CO_2-Fußabdrucks in den Digitalen Master und den Digitalen Zwilling samt integriertem Qualitätsmanagement vor, das zudem beispielhaft implementiert wurde und als Assistenzsystem in der Produktentstehung genutzt werden kann. Durch die mittels des vorgestellten Konzepts gesteigerte Transparenz trägt die vorliegende Dissertation von Herrn Winter in starkem Maße dazu bei, die ökologische Nachhaltigkeit bei der Entwicklung und der Produktion technischer Produkte zu berücksichtigen und zu verbessern.

Darmstadt, März 2025 Prof. Dr.-Ing. habil. Benjamin Schleich

Vorwort des Autors

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Product Life Cycle Management (PLCM) und dem Fachgebiet für Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) im Fachbereich Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt. Das PLCM ist im Jahr 2022 aus dem DiK hervorgegangen, als Herr Prof. Benjamin Schleich die Leitung des Fach-gebiets von Herrn Prof. Reiner Anderl übernahm.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Reiner Anderl, ehemaliger Leiter des Fachgebiets DiK. Seine wertvollen Anregungen, Empfehlungen und die fachlichen Diskussionen haben entscheidend zur Entstehung der Dissertation beigetragen.

Weiterhin möchte ich bei Herrn Prof. Benjamin Schleich bedanken, Leiter des Fachgebiets PLCM, der mir nach Übernahme des Fachgebiets Vertrauen und die wissenschaftlichen Freiräume zur Entfaltung des Themas entgegenbracht hat.

Ich möchte mich außerdem herzlich bei allen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen für die wunderbare Zusammenarbeit, die kreative Arbeitsatmosphäre und die schönen Momente innerhalb und außerhalb des Fachgebiets bedanken. Die zahlreichen fachlichen Diskussionen, die konstruktive Kritik und die Unterstützung haben entscheidend zur Fertigstellung dieser Dissertation beigetragen.

Mein besonderer Dank gilt meinen Freunden Benjamin Röhm, Slim Krückemeier, Niklas Quernheim, Lars Arnemann, Christian Plesker, Jan Oliver Osterod und Daniele Jung für die besondere Zeit, welche mich nur nicht fachlich, sondern auch zwischenmenschlich geprägt hat.

Ganz herzlich möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Sie haben mir meinen Werdegang ermöglicht, mich dabei stets motiviert und unterstützt.

Abschließend gilt der größte Dank Michaela für ihre uneingeschränkte Geduld und Unterstützung, die mich motiviert hat, die Dissertation zu vollenden. Sie hat diese Zeit mit Freude bereichert und mich inspiriert.

Darmstadt, März 2025 Sven Winter

Kurzfassung

Die Identifikation von Strategien zur Steigerung der Nachhaltigkeit von Produkten stellt produzierende Unternehmen vor große Herausforderungen. Die Voraussetzung zur Optimierung von Produkten ist die zuverlässige Ermittlung von ökologischen Kennzahlen wie dem CO_2-Fußabdruck. Die Berechnung des CO_2-Fußabdrucks ist allerdings an Rahmenbedingungen und Unsicherheiten geknüpft, da oftmals Sekundärdaten oder Schätzwerte in der Bilanzierung verwendet werden. Diese Unsicherheiten tauchen im alleinstehenden Endwert nicht auf und werden in der Nachhaltigkeitsbetrachtung üblicherweise vernachlässigt.

Die vorliegende Dissertation präsentiert ein Konzept zur Berechnung des CO_2-Fußabdrucks von Produkten mit ergänzendem Qualitätsmanagement und integriert die Kennzahl in den Digitalen Master bzw. Digitalen Zwilling des Produkts. Das Konzept ermöglicht die Berechnung des CO_2-Fußabdrucks in den Phasen der Produktentstehung durch die Nutzung unterschiedlicher Datenquellen. In den Phasen der virtuellen Produktentwicklung wird der Digitale Master verwendet, um Sekundärdaten aus Simulationsdaten, wie beispielsweise Rohmaterial oder Verbrauch einer Fertigungsmaschine, zu berechnen. Ab der Phase der Produktion kann der Digitale Zwilling genutzt werden, um Primärdaten automatisiert abzuleiten. Das Berechnungskonzept des CO_2-Fußabdrucks beinhaltet eine Ermittlung der Unsicherheit und wird durch ein Qualitätsmanagement ergänzt. Das Qualitätsmanagement beruht auf der Vergabe von Qualitätsindikatoren und resultiert in der neu entwickelten Kennzahl der Aussagekraftzahl des CO_2-Fußabdrucks. Begleitet wird die Berechnung des CO_2-Fußabdrucks durch ein Provenienzmodell, welches die Berechnung und deren Ursprung als Graph abbildet. Der Graph bietet eine Optimierungsgrundlage, indem die Hauptverursacher als Anteile an der Gesamtkennzahl direkt einsehbar sind. Weiterhin bildet der Graph die Aktivitäten, deren beteiligte Akteure sowie deren Vernetzung ab und es werden Informationen zur Zusammensetzung der Berechnung, den Autoren und Informationslücken dargestellt.

Das Resultat des CO_2-Fußabdrucks und des Qualitätsmanagements wird nach der Berechnung mit dem Digitalen Master bzw. Digitalen Zwilling verknüpft und wird somit in den Phasen der Produktentstehung als Grundlage einer Optimierung des Produkts zur Steigerung der ökologischen Nachhaltigkeit verstanden.

Das Konzept dieser Dissertation wird in einem softwaretechnischen Anwendungssystem prototypisch umgesetzt, welches als Assistenzsystem in der Produktentstehung genutzt werden kann.

Abstract

The identification of strategies to increase sustainability of products brings major challenges for manufacturing companies. The prerequisite for optimizing products is the availability of reliable key indicators such as the carbon footprint. However, the calculation of the carbon footprint is linked to general conditions and uncertainties, as secondary data or estimated values are often used in the calculation. These uncertainties do not appear in the stand-alone final value and are ignored in the sustainability assessment.

This dissertation presents a concept for calculating the carbon footprint of products with additional quality management and integrates the key indicator into the Digital Master respectively the Digital Twin of a product. The concept enables the calculation of the carbon footprint in the phases of product development by using different data sources. In the virtual product development phase, the Digital Master is used to calculate secondary data from simulation data such as raw materials or the consumption of a production machine. From the production phase onwards, the Digital Twin can be used to automatically derive primary data.

The calculation concept of the carbon footprint includes a determination of uncertainty and is expanded by a quality management, which is based on the assignment of quality indicators and results in the new key indicator of the expressiveness value of the carbon footprint. The calculation of the carbon footprint is accompanied by a provenance model, which depicts the calculation and its origin as a graph. The graph provides a basis for optimization by making the main sources of the key figure directly visible. Furthermore, the graph shows the activities and the actors involved as well as their interconnections and provides information on the composition of the calculation, the authors and information gaps.

The result of the carbon footprint and quality management is linked to the Digital Master or the Digital Twin after the calculation and is thereby understood in the phases of product creation as the basis for optimization to increase the ecological sustainability of the product.

The concept of this dissertation is prototypically implemented in a software application system which can be used as an assistance system in product development.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers ..... **III**

Vorwort des Autors ..... **IV**

Kurzfassung ..... **V**

Abstract ..... **VI**

Inhaltsverzeichnis ..... **VII**

Abbildungsverzeichnis ..... **X**

Tabellenverzeichnis ..... **XIII**

Abkürzungsverzeichnis ..... **XIV**

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation und Problemstellung 2

1.2 Zielsetzung 4

1.3 Aufbau der Dissertation 5

2 Grundlagen und Stand der Technik **6**

2.1 Digitalisierung und Nachhaltigkeit 6

2.1.1 Industrie 4.0 7

2.1.2 Digitaler Master und Digitaler Zwilling 8

2.1.3 Nachhaltigkeitsbetrachtung im Digitalen Zwilling 14

2.2 CO_2-Fußabdruck 15

2.2.1 Die Geschichte des CO_2-Fußabdrucks 15

2.2.2 Differenzierung der Begrifflichkeiten 17

2.2.3 Produktsicht des CO_2-Fußabdrucks 18

2.2.4 Ökobilanz 20

2.2.5 Übersicht über Normen und Leitfäden 22

2.3 Qualitätsmanagement 24

2.3.1 Datenqualität 25

2.3.2 Unsicherheit 27

2.3.3 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) 33

2.3.4 Datenprovenienz 36

2.4 STEP – ISO 10303 39

2.4.1 Grundlagen und Struktur 39

2.4.2 STEP-Anwendungsprotokoll 242 41

2.4.3 Aufbau einer STEP-Datei 42

2.5 Fazit und Forschungspotenzial 44

3 Handlungsbedarf und Anforderungsprofil 47

3.1 Handlungsbedarf 47

3.2 Zieldefinition 48

3.3 Betrachtetes Nutzungsszenario 49

3.4 Anforderungen 53

3.4.1 Allgemeine Anforderungen an das Konzept 53

3.4.2 Anforderungen an das Informationsmodell 55

3.4.3 Anforderungen an die Implementierung 57

3.4.4 Zusammenfassung der Anforderungen 59

4 Konzept zur Integration des CO_2-Fußabdrucks von Produkten in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling 62

4.1 Begriffsdefinitionen 62

4.2 Konzeptionelle Vorgehensweise 64

4.3 Einordnung des Konzepts 66

4.4 Informationsmodell zur Integration des CO_2-Fußabdrucks von Produkten in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling 68

4.4.1 Aufbau des Informationsmodells 69

4.4.2 Kernmodell PCF 72

4.4.3 Partialmodell Ökodaten 86

4.4.4 Partialmodell PCF Qualität 91

4.4.5 Partialmodell PCF Provenienz 99

4.4.6 Integration der Teilmodelle in ein Gesamtmodell 103

4.5 Fazit und Zusammenfassung 107

5 Prototypische Implementierung 111

5.1 Implementierungsarchitektur und Technologien 111

5.1.1 Datenquellen für Primär- und Sekundärdaten 115

5.1.2 Bewertung der Datenqualität 116

5.1.3 Provenienz 118

5.2 Fazit 119

6 Validierung und Verifikation 122

6.1 Repräsentatives Anwendungsbeispiel 122

6.2 Durchführung der Validierung 123

6.3 Bewertung der Validierung 133

6.4 Verifikation des Anforderungsprofils 134

6.5 Fazit zur Validierung und Verifikation 137

7 Ausblick 140

8 Zusammenfassung 142

9 Literatur 145

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Übersicht der vier industriellen Revolutionen 7
Abbildung 2-2: Grundkonzept des Digitalen Zwillings – Informationsspiegel-Modell nach [32] 9
Abbildung 2-3: Funktionen des Digitalen Zwillings in der Industrie 4.0 angelehnt an [61] 12
Abbildung 2-4: Der Ökologische Fußabdruck. Illustration aus 1996 [108] 16
Abbildung 2-5: Vier Phasen einer Ökobilanz [125] 20
Abbildung 2-6: Zusammenhang zwischen Datenqualität und Zeit und Aufwand in der Ökobilanz nach [127] 26
Abbildung 2-7: Hohe Präzision, niedrige Richtigkeit (links) und hohe Richtigkeit, niedrige Präzision (rechts) 28
Abbildung 2-8: Konzept von Präzision und Richtigkeit 28
Abbildung 2-9: Flächenermittlung mit MCS mit 100 Koordinatenpunkten (links) und 500 Koordinatenpunkten (rechts) 30
Abbildung 2-10: Wirkungskette von Fehlerursachen (FU), Fehler (F) und Fehlerfolgen (FF) [184] 34
Abbildung 2-11: Allgemeiner Ablauf einer FMEA 34
Abbildung 2-12: Knoten und Beziehungen des PROV-Datenmodells nach [203] 38
Abbildung 2-13: Struktur der ISO 10303 nach [211] mit Ergänzungen von [212, 213] .. 40
Abbildung 2-14: Beispiel für den Zusammenhang zwischen Datenmodell, realen Objekten und p21-Datei nach [207] 44
Abbildung 3-1: Anwendungsfalldiagramm des Nutzungsszenarios 51
Abbildung 4-1: Einordnung des Konzepts in die integrierte Produkt- und Prozessentwicklung 68
Abbildung 4-2: Elemente des Informationsmodells zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling mit dem Kernmodell PCF und dessen Verbindung zu den Partialmodellen 70
Abbildung 4-3: Schematische Struktur des Informationsmodells 72
Abbildung 4-4: Kernmodell PCF des Informationsmodells zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling als UML-Klassendiagramm 73
Abbildung 4-5: UML-Aktivitätsdiagramm „PCF Berechnung initialisieren und Quelle für Ökodaten bestimmen“ zur Ermittlung des PCF mit unterschiedlichen Datenquellen 77
Abbildung 4-6: Durchführung der Unsicherheitsberechnung des PCF 79
Abbildung 4-7: Auswahl der Berechnungsmethode zur Unsicherheitsbestimmung des PCF in Anlehnung an [241] 82
Abbildung 4-8: Durchführung der Datenvorbereitung 1 des PCF aufgeteilt in die Organisationseinheiten Verbrauchsdaten (Primärdaten) und Umrechnungsfaktor 83

Abbildung 4-9: Durchführung der Datenvorbereitung 2 des PCF aufgeteilt in die Organisationseinheiten Verbrauchsdaten (Sekundärdaten) und Umrechnungsfaktor 85
Abbildung 4-10: Partialmodell Ökodaten des Informationsmodells zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling als UML-Klassendiagramm 86
Abbildung 4-11: Funktionselemente einer Sensorik nach [247] 89
Abbildung 4-12: Erhebung der Verbrauchsdaten von Sekundärdaten aus Simulationsdaten eines Fertigungsprozesses 91
Abbildung 4-14: Partialmodell PCF Qualität des Informationsmodells zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling als UML-Klassendiagramm 92
Abbildung 4-15: Partialmodell PCF Provenienz des Informationsmodells zur Integration des PCF in den Digitalen Zwilling als UML-Klassendiagramm 99
Abbildung 4-16: Beispielhafte Darstellung eines Sankeydiagramms für CO_2-Äquivalente 100
Abbildung 4-17: PCF Provenienzgraph eines PCF mit drei pPCF als Entitäten und variierenden Pfeilstärken 101
Abbildung 4-18: Erweiterung des pPCF 2 um Aktivitäten, weitere Entitäten und Akteure der PCF Berechnung 102
Abbildung 4-19: Aktivitätsdiagramm des Gesamtmodells zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling 104
Abbildung 4-20: Gesamtmodell der Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling als UML-Klassendiagramm 107
Abbildung 5-1: Implementierungsarchitektur und Technologien der prototypischen Implementierung 112
Abbildung 5-2: Übersicht der Benutzungsoberfläche des Assistenzsystems CO_2mpass 114
Abbildung 5-3: Datenquellen in der Benutzungsoberfläche 116
Abbildung 5-4: Beispiel einer Verknüpfung zwischen Assistenzsystem und Maschine 116
Abbildung 5-5: Datenqualitätsbewertung in der Benutzungsoberfläche 117
Abbildung 5-6: Provenienz in der Benutzungsoberfläche 118
Abbildung 6-1: Visualisierung des Beispielbauteils Stiftehalter mit Positionierung der Einzelteile: (1) Oberteil, (2) Unterteil und (3) Zylinderkopfschraube 123
Abbildung 6-2: Automatisierte Ableitung und Darstellung von Namen, Stückliste und Visualisierung aus der STEP-Datei im Assistenzsystem 124
Abbildung 6-3: Auszug des Imports einer externen Ökodatenbank im Assistenzsystem 125
Abbildung 6-4: Import der internen Datenbank im Assistenzsystem: (1) linke Tabellenhälfte, (2) rechte Tabellenhälfte 126

Abbildung 6-5: PCF Übersichtstabelle der Baugruppe Stiftehalter: (1) linke Tabellenhälfte, (2) rechte Tabellenhälfte 127
Abbildung 6-6: Ergebnisse des Gesamt PCF, der Unsicherheitsberechnung nach FFP und MCS sowie die Wahrscheinlichkeitsverteilung der MCS als Histogramm 128
Abbildung 6-7: Ergebnis der Berechnung der Datenanteile als Kreisdiagramm im Assistenzsystem 128
Abbildung 6-8: Eingabe der Bewertungskriterien für die pPCF und Ergebnis der Datenqualitätsberechnung im Assistenzsystem 129
Abbildung 6-9: Ergebnis der Berechnung der AKZ im Assistenzsystem 129
Abbildung 6-10: PCF Sankeydiagramm der Baugruppe Stiftehalter im Assistenzsystem. Alle Werte in kg CO_2eq 130
Abbildung 6-11: Stufe eins des PCF Provenienzgraph der Baugruppe Stiftehalter im Assistenzsystem 130
Abbildung 6-12: Stufe zwei des PCF Provenienzgraph der Baugruppe Stiftehalter im Assistenzsystem: Informationserweiterung des Einzelteils Unterteil ... 131
Abbildung 6-13: Stufe drei des PCF Provenienzgraph der Baugruppe Stiftehalter im Assistenzsystem: Informationserweiterung des Energieverbrauchs des Einzelteils Unterteil 131
Abbildung 6-14: PMI zur Visualisierung des PCF in Siemens NX: Gesamt PCF und PCF der Einzelteile 133

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht von Standards, Normen und Leitfäden 22
Tabelle 3-1: Anforderungsprofil an das Konzept 59
Tabelle 4-1: Konzeptstruktur des Informationsmodells 69
Tabelle 4-2: Bewertungskriterien für den DQI von Primärdaten adaptiert nach [141] 94
Tabelle 4-3: Bewertungskriterien für den DQI von Sekundärdaten aus internen und externen Ökodatenbanken adaptiert nach [141] 95
Tabelle 4-4: Bewertungskriterien für den DQI von Sekundärdaten aus Simulationsdaten mit ergänzendem SF von Fertigungsprozessen 96
Tabelle 4-5: Ausgewählte Maßnahmen inklusive Hilfsmittel zur Steigerung der Aussagekraftzahl des PCF 98
Tabelle 6-1: Stückliste des Anwendungsbeispiels Stiftehalter 123
Tabelle 6-2: Verknüpfung der IDs des PCF mit den Hashs der Entitäten aus der STEP-Datei 132
Tabelle 6-3: Übersicht der Anforderungserfüllung 135

Abkürzungsverzeichnis

AKZ ..... Aussagekraftzahl
AM ..... analytische Methode
AP ..... Anwendungsprotokoll

BOM ..... Bill of Material
BSI ..... British Standards Institution

CCF ..... Coporate Carbon Footprint
CFP ..... Carbon Footprint of Products
CNC ..... Computerized Numerical Control
CO2eq ..... CO_2-Äquivalente
CPS ..... Cyber-physische Systeme
css ..... Cascading Style Sheets

DALY ..... Disability Adjusted Life Years
DQI ..... Datenqualitätsindex
DQR ..... Data Quality Rating

ERP ..... Enterprise-Resource-Planning

FFF ..... Fused Filament Fabrication
FFP ..... Fehlerfortpflanzung
FMEA ..... Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse

GHG-Protocol ..... Greenhouse-Gas-Protocol
GR ..... geographische Repräsentativität
GWP ..... global warming potential

html ..... Hypertext Markup Language

js ..... JavaScript
JSON ..... JavaScript Object Notation

KMU ..... kleine und mittlere Unternehmen

LCA ..... Life Cycle Assessment
LCSA ..... Life Cycle Sustainability Assessment

MCS ..... Monte-Carlo-Simulation
MES ..... Manufacturing Execution Systems

NASA ..... National Aeronautics and Space Administration

OEF ..... Organisational Environmental Footprint
OMG ..... Object Management Group
OPM ..... Open Provenance Model

PCF ..... Product Carbon Footprint
PEF ..... Product Environmental Footprint
PIK ..... Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung
PLZ ..... Produktlebenszyklus
PM ..... probabilistische Methode
PMI ..... Product and Manufacturing Information
pPCF ..... partieller PCF

REST API ..... Representational State Transfer Application Programming Interface
RPZ ..... Risikoprioritätszahl

SDAI ..... Standard Data Access Interface
SF ..... Spezialfall

TCF ..... Transport Carbon Footprint
THG ..... Treibhausgas
TR ..... technologische Repräsentativität

UML ..... Unified Modeling Language

Ver ..... Verlässlichkeit
Vo ..... Vollständigkeit

WCED ..... World Commission on Environment and Development

WWF ..... World Wide Fund for Nature

XML.....eXtensible Markup Language

ZR ..... zeitbezogene Repräsentativität

1 Einleitung

Der CO_2-Fußabdruck dient als Kennzahl der ökologischen Nachhaltigkeit von Produkten. Um die Kennzahl zu berechnen, werden Treibhausgase, die im Lebensweg des Produkts emittiert oder absorbiert werden, mittels definierter Faktoren in CO_2-Äquivalente umgerechnet und summiert. Durch diese Kennzahl soll eine Aussage entstehen, welchen Einfluss das Produkt auf die Umwelt hat. Eine gängige Betrachtung ist die Begrenzung der Bilanzierung bis zum Verlassen der Werkshalle. Dies ist ein üblicher Zeitpunkt, an dem die Bilanzierung durchgeführt wird. Allerdings werden die Entscheidungen wie die Gestalt des Produkts und die Art der Produktion bereits in der virtuellen Produktentwicklung getroffen. Eine Optimierung des Produkts hinsichtlich einer Minimierung des CO_2-Fußabdrucks setzt ein Vorhandensein der Kennzahl in der virtuellen Produktentwicklung und in der Produktion voraus.

In dieser Dissertation wird ein Konzept vorgestellt, wie der CO_2-Fußabdruck von Produkten in den Phasen der Produktentstehung, welche die virtuelle Produktentwicklung und die Produktion umfassen, berechnet werden kann. Ergänzt wird das Konzept um die Berechnung der Unsicherheit und ein Qualitätsmanagement, um eine transparente Entscheidungsgrundlage zu liefern, inwieweit der CO_2-Fußabdruck als Basis zur Optimierung des Produkts und zur Vergleichbarkeit von verschiedenen CO_2-Fußabdrücken genutzt werden sollte. Da die Informationsgüte der Berechnungsdaten stark variiert, ist eine transparente Darstellungsform der Berechnung ein Kernelement des Konzepts. Beispielsweise können in der Produktion Primärdaten aufgenommen werden, welche die produktspezifischen Verbräuche der Produktionsmaschine realitätsnah abbilden – wohingegen zum Zeitpunkt der virtuellen Produktentwicklung die Verbräuche durch Sekundärdaten geschätzt werden müssen. Um die Transparenz zu gewährleisten, wird die Berechnung des CO_2-Fußabdrucks durch ein Provenienzmodell erweitert, welches die Ursprünge der Berechnung, der Daten und deren Autoren als Graph abbildet. Durch die Provenienzdarstellung lässt sich die Berechnung des CO_2-Fußabdrucks nachvollziehen und analysieren, sodass Informationslücken gefunden werden können und die Aussagekraft des CO_2-Fußabdrucks gesteigert werden kann.

Der Digitale Master und der Digitale Zwilling sind die zentralen Elemente dieser Dissertation und tragen zur Bewältigung mehrerer Herausforderungen bei. Zum einen können durch die Digitalen Zwillinge von Produktionsmaschinen Primärdaten als Sensorwerte

während der Produktion aufgenommen werden. Diese Verbrauchswerte lassen sich automatisiert zur Berechnung des CO_2-Fußabdrucks nutzen und müssen nicht nachträglich ermittelt und aufbereitet werden. Zum anderen wird der Digitale Master des Produkts dazu genutzt, Informationen zur Gestalt wie dem Körper oder zur Simulation der Produktion zu nutzen. Ab der Phase der Produktion liegt ein Digitaler Zwilling des Produkts vor und es kann eine individuelle Berechnung des CO_2-Fußabdrucks durchgeführt werden. Der Digitale Master bleibt dabei Bestandteil des Digitalen Zwillings. Darüber hinaus wird der Digitale Master bzw. Digitale Zwilling des Produkts mit den partiellen CO_2-Fußabdrücken angereichert, was eine gezielte Optimierung des Produkts ermöglicht.

Durch die Integration des CO_2-Fußabdrucks in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling kann die Kennzahl in den Phasen der Produktentstehung erhoben und von Produktentwicklern[1] genutzt werden.

Dieses Kapitel gliedert sich in die Motivation und Problemstellung in Kapitel 1.1, gefolgt von der Zielsetzung in Kapitel 1.2. Im dritten Kapitel 1.3 wird der Aufbau der Dissertation beschrieben.

1.1 Motivation und Problemstellung

Digitale Technologien bringen neue Möglichkeiten zur Informationsgewinnung und -verarbeitung, die das Leben und Arbeiten im 21. Jahrhundert verändern werden. Durch die Digitalisierung können Ursache-Wirkung-Beziehungen aufgestellt und somit die ökologische Nachhaltigkeit quantifizierbar gemacht werden. Handlungen oder Produkte können durch die Quantifizierung direkt mit der globalen Erderwärmung korreliert werden.

Zur Bewältigung der immer größer werdenden Herausforderung des Klimawandels werden regulatorische Maßnahmen benötigt, die den Effekt festgesetzter Bestrebungen aufzeigen. Das bekannteste Ziel ist die Einhaltung des Pariser Klimabkommens von 2015, an dem sich 195 Staaten unter anderem auf die Beschränkung des weltweiten Temperaturanstiegs auf 2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalters festgelegt haben [1]. Um dieses Ziel zu erreichen, möchte die Europäische Union ihre Treibhausgasemissionen bis 2050 um 95 % im Vergleich zu 1990 und in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts um nahezu 100 % reduzieren [2]. Die Menge der emittierten Treibhausgase und die damit einhergehende Erderwärmung wird durch digitale Technologien erfassbar und kann

[1] In dieser Dissertation wird das generische Maskulinum zur Vereinfachung der Lesbarkeit verwendet. Gemeint sind jedoch alle Personen unabhängig des Geschlechts.

unmittelbar auf Sektoren wie Verkehr oder Landwirtschaft korreliert werden [3]. Die Erfassung beruht auf direkt gemessenen Werten der emittierten Treibhausgase und Hochrechnungen meist über Jahre aus den einzelnen Sektoren.

Doch wie lässt sich eine Korrelation zwischen neuen Produkten und den globalen Nachhaltigkeitszielen herstellen, die selbst keine Treibhausgase emittierten oder absorbieren?

Eine Möglichkeit der Korrelation stellt der CO_2-Fußabdruck dar. Auch wenn es zunächst den Anschein hat, dass Produkte wie ein gefrästes Aluminiumbauteil keine Verbindung zu direkten Treibhausgasen besitzen, so tragen sie durch ihre Entstehung einen sogenannten CO_2-Rucksack mit sich. Wird elektrische Energie in der Produktion oder in der Nutzung verbraucht, so lässt sich auch diese Energie über den Anteil an konservativer Stromerzeugung durch beispielsweise Kohleverstromung auf Treibhausgase zurückführen. Über die Umrechnung in CO_2-Äquivalente und Summierung wird der CO_2-Fußabdruck errechnet.

Einen Zusammenhang zwischen globalen Klimazielen und Nachhaltigkeitsindikatoren wie dem CO_2-Fußabdruck stellt das Konzept der absoluten ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung dar, welches in den vergangenen Jahren zunehmend Anwendung findet [4]. Dabei ist eine Obergrenze für Sektoren über Unternehmen bis hin zu Produkten zu definieren, die nicht überschritten werden soll, damit eine bleibende Schädigung der Umwelt ausbleibt. Wie diese Obergrenze als Soll-Größe heruntergebrochen werden kann, ist aktueller Gegenstand der Forschung, allerdings hat sich die Quantifizierung der Ist-Größe durch die Ökobilanz über Jahrzehnte bis hin zur Normung weiterentwickelt [5].

Der CO_2-Fußabdruck als Teilergebnis der Ökobilanz ist in diversen Anwendungen zu finden und wurde in die Werkzeuge der virtuellen Produktentstehung integriert [6]. Allerdings ist der Nutzen der Kennzahl als Optimierungsparameter bisher mit Vorsicht zu verwenden, da oftmals keine Aussage über die Qualität der Daten getroffen wird und die gewählten Rahmenbedingungen unbekannt sind. So zeigt eine Studie, dass nur 29 % von 58 Ökobilanzen rekonstruiert werden können [7]. Eine Berechnung der Unsicherheit, die einen Eindruck der Verlässlichkeit der Kennzahl vermitteln kann, ist beispielsweise in einem Leitfaden zur Berechnung des CO_2-Fußabdruck des World Business Council for Sustainable Development als optional eingestuft [8]. Trotz dieser Einschränkungen wird der CO_2-Fußabdruck als Messgröße der ökologischen Nachhaltigkeit verstanden, an der sich Geschäftskunden, Konsumenten und Investoren orientieren [9].

Resultierend bietet der CO_2-Fußabdruck eine Möglichkeit, die Auswirkung von Produkten auf die Umwelt mit einer einzigen Kennzahl zu messen. Die Qualität und Transparenz

der Berechnung und der Daten der Anwendungsfälle variiert stark, sodass mit der alleinigen Kennzahl eine Optimierung oder Vergleichbarkeit nicht zu empfehlen ist. Zudem ist die Bilanzierung aufwendig und sie wird meist nachgelagert nach der Produktion durchgeführt, sodass die Kennzahl in der Produktentstehung nicht verwendet werden kann, obwohl sie dort den größten Stellhebel zur Minimierung der Umweltauswirkung besitzt.

Durch digitale Tools wie dem Digitalen Master von Produkten oder dem Digitalen Zwilling von Produktionsmaschinen bieten sich Möglichkeiten, wie der CO_2-Fußabdruck zukünftig produktspezifisch und aufwandsarm ermittelt werden kann. Die stetige Weiterentwicklung des Konzepts des Digitalen Zwillings hat dafür gesorgt, dass Produktionsmaschinen sowie Produkte ein digitales Abbild besitzen. Die Herausforderung besteht darin, die Kennzahl in das Konzept des Digitalen Masters und des Digitalen Zwillings zu integrieren, um einen Synergieeffekt zwischen Nachhaltigkeit und Digitalisierung zu erzeugen.

1.2 Zielsetzung

Die beschriebene Ausgangslage der aktuellen Verwendung des CO_2-Fußabdrucks verdeutlicht, dass dieser weiterentwickelt werden muss, um ihn zum Zweck der Optimierung und Vergleichbarkeit von Produkten oder zur Einhaltung von Obergrenzen zu nutzen. Daraus leitet sich der Kern dieser Dissertation ab: eine transparente Berechnung des CO_2-Fußabdrucks, die in den Phasen der Produktentstehung durchführbar sein soll und um die Aussagekraft der Kennzahl durch ein Qualitätsmanagement ergänzt wird.

Das Hauptziel untergliedert sich in vier Teilziele. Zunächst muss untersucht werden, wie die Berechnung des CO_2-Fußabdrucks unabhängig der Phase der Produktentwicklung eine valide Datengrundlage besitzt. Es ist eine Methodik zu entwickeln, die ein Vorgehen der Datenauswahl vorgibt. Zusätzlich ist die Unsicherheit des CO_2-Fußabdrucks in Vorbereitung eines Qualitätsmanagements zu berechnen.

Das zweite Teilziel befasst sich mit der Fragestellung, wie der Digitale Master und der Digitale Zwilling zur Berechnung des CO_2-Fußabdrucks genutzt werden kann und wie die Kennzahl nach der Berechnung mit dem Digitalen Master und Digitalen Zwilling verknüpft sein kann, um ihn weiter zu verwenden.

Im dritten Teilziel wird der Frage nachgegangen, wie die Qualität des CO_2-Fußabdrucks messbar ist. Die unterschiedlichen Daten sollen auf Eignung geprüft werden und in einer kompakten Darstellung ergänzend zum finalen Wert des CO_2-Fußabdrucks abbildbar sein. Es ist eine Methodik zur Durchführung eines Qualitätsmanagements zu entwickeln,

die nach der Berechnung des CO_2-Fußabdrucks durchgeführt werden kann und aufzeigt, wie die Aussagekraft erhöht werden kann.

Das vierte Teilziel untersucht die Möglichkeit einer transparenten Darstellungsform des CO_2-Fußabdrucks. Die getroffenen Entscheidungen sollen protokolliert und durch Dritte nachvollziehbar sein. Durch diese Darstellungsform soll der CO_2-Fußabdruck analysiert werden können, um Schwachstellen der Berechnung und Informationsgüte zu identifizieren.

1.3 Aufbau der Dissertation

Diese Dissertation umfasst acht Kapitel. Nach der thematischen Einführung, der Motivation und Problemstellung sowie Zielsetzung in diesem Kapitel folgen in Kapitel 2 die Grundlagen und der Stand der Technik. Dort werden die Themenfelder Digitalisierung und Nachhaltigkeit, CO_2-Fußabdruck, Qualitätsmanagement und STEP (Standard for the Exchange of Product Data) genauer beleuchtet. Abschließend wird ein Fazit gezogen und das resultierende Forschungspotenzial aufgezeigt.

Das Kapitel 3 widmet sich dem Handlungsbedarf und dem Anforderungsprofil dieser Dissertation. Nach der Beschreibung des Handlungsbedarfs wird eine Zieldefinition formuliert und das betrachtete Nutzungsszenario skizziert. Im Anschluss werden die Anforderungen an das zu entwickelnde Konzept aufgestellt.

In Kapitel 4 wird das Konzept zur Integration des CO_2-Fußabdrucks in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling entwickelt, das den Kern dieser Dissertation bildet. Dazu werden Begriffe definiert und die konzeptionelle Vorgehensweise sowie die Einordnung des Konzepts beschrieben. Anschließend wird das Informationsmodell bestehend aus einem Kernmodell und drei Partialmodellen detailliert erläutert. Nach einer Zusammenführung in ein Gesamtmodell wird ein Fazit und eine Zusammenfassung des Kapitels verfasst.

Es folgt eine prototypische Implementierung des Konzepts in Kapitel 5. Zunächst wird ein Überblick über die Implementierungsarchitektur und die verwendeten Technologien gegeben. Die softwaretechnische Umsetzung der Methoden des Konzepts stellt eine Grundlage zur Überprüfung der Praxistauglichkeit des Konzepts dar.

Diese Praxistauglichkeit wird in Kapitel 6 anhand eines repräsentativen Anwendungsbeispiels demonstriert. Neben dieser Überprüfung als Validierung wird das aufgestellte Anforderungsprofil aus Kapitel 3 verifiziert.

Kapitel 7 beinhaltet einen Ausblick auf Erweiterung des Konzepts dieser Dissertation und stellt weitere Forschungsfragen dar, die sich durch diese Dissertation ergeben haben. Es folgt eine Zusammenfassung in Kapitel 8, die den Abschluss dieser Dissertation bildet.

2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die für diese Dissertation erforderlichen Grundlagen sowie der Stand der Technik erläutert. Die Beschreibung der Grundlagen liefert einen Rahmen zum Verständnis dieser Arbeit und grenzt die Thematik ein. Zu Beginn wird auf den Themenkomplex der Digitalisierung und Nachhaltigkeit eingegangen. Dabei wird der Fokus auf die Grundlagen der Industrie 4.0 und den Digitalen Master sowie Digitalen Zwilling gelegt. Es wird erläutert, wie diese im Kontext der Dissertation verstanden werden. Es folgt eine Beschreibung der Nachhaltigkeitsbetrachtung mithilfe von Digitalen Zwillingen. Anschließend wird der CO_2-Fußabdruck als Kenngröße der ökologischen Nachhaltigkeit thematisiert. Dabei wird zunächst die Geschichte des CO_2-Fußabdrucks beschrieben und durch eine Differenzierung der Begrifflichkeiten und der Produktsicht ergänzt. Die dem CO_2-Fußabdruck zugrunde liegende Methodik der Ökobilanz wird darauffolgend erläutert. Im dritten Unterkapitel der Grundlagen wird das Qualitätsmanagement beschrieben. Innerhalb dieses Unterkapitels wird auf die Datenqualität und die Unsicherheit grundlegend und im Fokus einer Ökobilanz eingegangen. Es folgen die Beschreibungen der Qualitätsmanagementmethode Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) und der Datenprovenienz. Im vierten Unterkapitel wird STEP eingeführt, welches als Grundlage des Digitalen Masters und Digitalen Zwillings in dieser Arbeit genutzt wird. Im abschließenden Kapitel wird ein Fazit zum Stand der Technik gezogen und der wissenschaftliche Forschungsbedarf, der in dieser Dissertation adressiert wird, aufgezeigt.

2.1 Digitalisierung und Nachhaltigkeit

Sowohl Digitalisierung als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts als auch Nachhaltigkeit als globales Rahmenwerk stehen für eine Transformation der modernen Arbeitswelt sowie der modernen Lebensweise und beeinflussen sich gegenseitig [10–12]. Beispielsweise ist eine Überwachung einer nachhaltigen Entwicklung ohne Digitalisierung nicht möglich. Dabei kann Digitalisierung verstanden werden als zunehmende Vernetzung und Algorithmisierung von Prozessen, Produkten und Geschäftsmodellen [13] und Nachhaltigkeit als schonender Umgang mit Ressourcen [14]. Genauer betrachtet wird Nachhaltigkeit in einem Drei-Säulen-Modell definiert: ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit, welche untereinander Synergien aufweisen [15]. Die Digitalisierung bietet zahlreiche Chancen für den Aufbau einer nachhaltigen Gesellschaft auf der

Grundlage der drei Säulen und kann somit als Schlüssel für einen nachhaltigen Entwicklungspfad gesehen werden [16]. In den folgenden Kapiteln wird daher die Digitalisierung vorgestellt, wie sie im Rahmen dieser Arbeit verstanden wird.

2.1.1 Industrie 4.0

Der hervorgerufene Wandel durch die Informationstechnik wird als Digitalisierung oder digitale Transformation bezeichnet und beeinflusst viele Lebensbereiche [17]. Aus diesem Verständnis hat sich die Terminologie „Industrie 4.0“ als Auslöser der vierten industriellen Revolution entwickelt [18, 19]. Abbildung 2-1 veranschaulicht die Historie der industriellen Revolutionen:

Abbildung 2-1: Übersicht der vier industriellen Revolutionen

Nach der ersten industriellen Revolution im 18. Jahrhundert durch die Nutzung von Wasser- und Dampfkraft ist die zweite industrielle Revolution im 19. Jahrhundert durch Elektrizität und den Weg zur Massenproduktion charakterisiert. Die dritte industrielle Revolution fand Einzug in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts durch die Einführung der Informationstechnologie in industrielle Prozesse und in die Produktentwicklung. Die Haupttreiber der vierten industriellen Revolution, in der wir uns aktuell befinden, und Kern der Industrie 4.0 stellen Cyber-physische Systeme (CPS) dar [20]. CPS verwenden eingebettete Elektronik, Software, Sensoren und Netzwerkverbindungen, um die Erfassung und den Austausch von Daten zu ermöglichen und so auf einer virtuellen und physischen Ebene zu arbeiten [21]. Diese neue Art der Kommunikation ermöglicht einen gezielten Informationsaustausch innerhalb verschiedener Ebenen eines Unternehmens, die auch als vertikale Integration bekannt ist. Durch diese vertikale Integration entsteht beispielsweise ein bidirektionaler Informationsfluss zwischen Systemen zur Planung der Unternehmensressourcen (engl. *Enterprise-Resource-Planning (ERP))* und Systemen zur

Fertigungsausführung (engl. *Manufacturing Execution Systems – MES*) [22]. In der horizontalen Integration wird die Kommunikation verschiedener IT-Systeme für unterschiedlichen Prozessschritte der Produktion oder der Unternehmensplanung, zwischen denen ein Material-, Energie- und Informationsfluss verläuft, ermöglicht [19]. Dies gilt für Prozessschritte innerhalb eines Unternehmens wie Eingangslogistik, Fertigung, Ausgangslogistik, und Vermarktung sowie für mehrere Unternehmen in einem Wertschöpfungsnetzwerke [19]. So werden beispielsweise durch Frühwarnsysteme Kapazitätsengpässe aufgezeigt [23] oder die Datenbasis für eine Ökobilanz gelegt [24]. Die durchgängige vertikale und horizontale Integration ist aus technischer und ökonomischer Sicht ein Schlüsselfaktor in der Umsetzung der Industrie 4.0, da hier ein Austausch und eine Bündelung von Ressourcen über unterschiedliche Wertschöpfungsstufen innerhalb eines Netzwerks und unterschiedliche Ebenen im Produktionsunternehmen stattfinden kann [25].

Ein Ziel der Industrie 4.0 ist es, Produktionsnetze zu etablieren, die effizient und effektiv sowie kostengünstig produzieren [26]. Neben der Effizienzsteigerung finden eine Flexibilisierung, eine Reduktion von Vorlaufzeiten und eine Individualisierung für Kundenwünsche mit kleinen Losgrößen statt [27]. Die Industrie 4.0 ermöglicht durch die Vernetzung der einzelnen Akteure intelligente Wertschöpfungsnetze [28]. Smarte Produkte und Produktionssysteme können ebenso erwartet werden wie eine Steigerung der Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz [29].

2.1.2 Digitaler Master und Digitaler Zwilling

Der Digitale Master ist das Ergebnis der Produktentwicklung und existiert vor der Produktion. Er beinhaltet digital-mathematische rechnerinterne Produktmodelle, wie beispielsweise CAD-Modelle oder Simulationen. Der Digitale Master ist Teil des Digitalen Zwillings, der ab dem Zeitpunkt der Produktion aus einer realen Produktinstanz erzeugt oder aus dem Digitalen Master abgeleitet wird und wird als Schlüsselkonzept der der Industrie 4.0 verstanden [30, 31].

Für das Konzept des Digitalen Zwilling existieren kein einheitliches Vorgehen und keine allgemeingültige Definition. Daher werden in diesem Abschnitt das Grundkonzept, der Ursprung und die aktuelle Verwendung des Begriffs sowie eine für diese Dissertation geltende Definition vorgestellt.

In der Abbildung 2-2 sind die drei Elemente des Grundkonzepts des Digitalen Zwillings zu sehen: die reale Umgebung mit dem physischen Zwilling, die virtuelle Umgebung mit dem Digitalen Zwilling und Daten sowie Informationen, welche die beiden Systeme ver-

knüpfen [32]. Der physische Zwilling agiert in der realen Umgebung und liefert über Sensorik Daten über den aktuellen Zustand. Diese Daten werden an die virtuelle Umgebung gesendet und erzeugen eine Spiegelung der realen Zustände im Digitalen Zwilling.

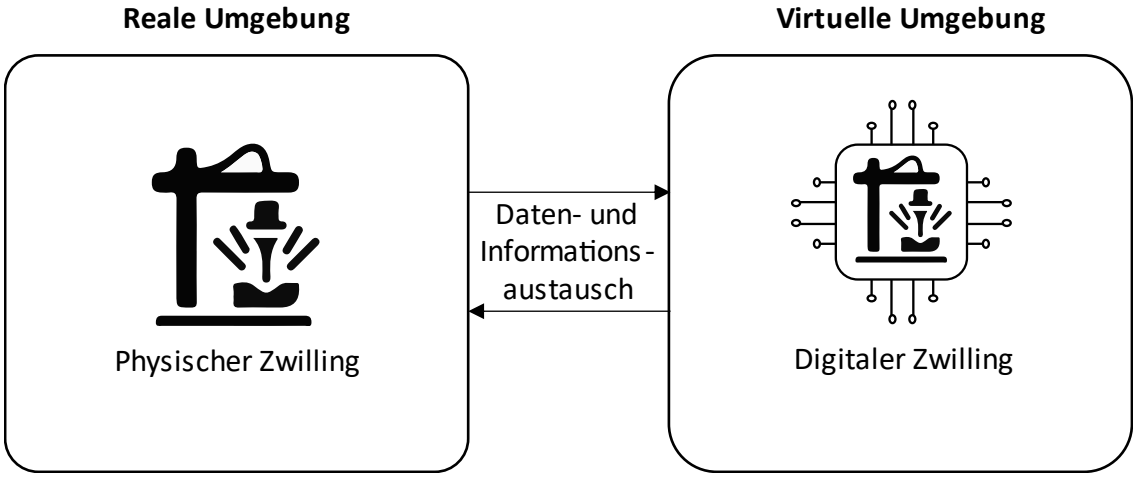


Abbildung 2-2: Grundkonzept des Digitalen Zwillings – Informationsspiegel-Modell nach [32]

Im virtuellen Gegenstück sind Eigenschaften, Zustand und Verhalten des realen Objekts durch Modelle und Daten abgebildet [33]. Der Digitale Zwilling wiederum stellt spezifisch definierte Informationen bereit, die an den physischen Zwilling übergeben werden. Die bidirektionale Beziehung als Datenverbindung zwischen den beiden Systemen, welche durch die Weiterentwicklung der Netzwerktechnologie ermöglicht wurde, gilt als Kernelement des Digitalen Zwillings[34].

Historie und Definitionen des Digitalen Zwillings

Die erste Idee eines Zwillings wurde 2010 von der NASA (National Aeronautics and Space Administration) in der „Technologie Roadmap“ vorgestellt, indem an einem baugleichen zweiten Raumschiff Zustände des sich im Weltraum befindlichen Raumschiffs nachgestellt wurden [35–37]. Somit konnte ein Verhalten des Raumschiffs bei kritischen Entscheidungen simuliert und analysiert werden. Der Zwilling kann als Entscheidungsunterstützung der Astronauten verstanden werden, indem Zustände des zu untersuchenden Objekts gespiegelt werden. Kurz darauf wurde das Konzept in der Luftfahrt zu einem digitalen Abbild weiterentwickelt. Der so entstandene Digitale Zwilling war in der Lage, fluiddynamische, strukturdynamische und thermodynamische Simulationen sowie Spannungsveränderungen zu berechnen, um Aussagen über Wartung und Instandhaltung des realen Flugzeugs zu treffen [38]. Glaessgen und Stargel waren 2012 folglich zwei der ersten Autoren, die den Digitalen Zwilling als exaktes Abbild eines physischen Systems durch integrierte Simulationen mittels physikalischer Modellbildung mit aktuellen und historischen Sensordaten definierten [36]. Gockel et al. be-

schreiben im gleichen Jahr den Digitalen Zwilling als ein ultra-realistisches Computermodell mit Bau- und Wartungsgleichheit, das explizit mit den Material- und Fertigungsspezifikationen, Kontrollen und Prozessen des realen Objekts verbunden ist. Es handelt sich um ein konsistentes Modell, das die Abweichungen und Unsicherheiten des realen Objekts berücksichtigt [39].

Die Übersichtsarbeit von NEGRI ET AL. zeigt die Verwendung des Begriffs Digitaler Zwilling (engl. *Digital Twin*) im englischsprachigem Raum in den Jahren 2012 bis 2016 [40]: Bis 2015 wurde der Begriff hauptsächlich durch den Luft- und Raumfahrtsektor genutzt mit Fokus auf den Disziplinen der Strukturmechanik und der Materialwissenschaften. Mithilfe des Digitalen Zwillings wurden Materialermüdung, Rissbildung und Deformation des physischen Zwillings simuliert und somit eine Zustandsüberwachung mit verbesserter Wartung und Instandhaltung gewährleistet. Der Großteil der untersuchten Veröffentlichungen entstand in den Jahren 2015 und 2016 mit dem Konzept der Industrie 4.0 und erweitert die Anwendungsmöglichkeiten zu:

- Voraussage des Langzeitverhaltes und der Leistung des Systems [41–45],
- nahtlose Informationsbereitstellung zur Optimierung des Produktlebenszyklus [46–48],
- Entscheidungsunterstützung durch rechnergestützte und statistische Analysen sowie Simulationen [49–54]
- und der Vernetzung zwischen verschiedenen Systemen [55–57].

Der Digitale Zwilling wird auf Grundlage der Recherche von NEGRI ET AL. als digitale Repräsentation eines realen Objektes auf der Basis von semantischen Datenmodellen mit Echtzeit-Synchronisation von Sensordaten und der Möglichkeit von Simulationen definiert [40].

Eine weitere, allgemein gehaltene Definition liefern BOSCHERT UND ROSEN 2016 durch die Vision des Digitalen Zwillings als ein Konzept, das eine vollständige materielle und funktionale Beschreibung einer Komponente, eines Produkts oder eines Systems enthält, die in aktuellen und nachfolgenden Lebenszyklusphasen von Nutzen sein können [58]. BRENNER UND HUMMEL beschreiben 2017 den Digitalen Zwilling als digitale Kopie einer realen Fabrik, einer Maschine, eines Arbeiters etc., die erstellt wird und unabhängig erweitert werden kann, automatisch aktualisiert wird sowie weltweit in Echtzeit verfügbar ist [59]. Im Bereich der additiven Fertigungsverfahren definieren MUKHERJEE UND DEBROY 2019 den Digitalen Zwilling als eine virtuelle Nachbildung einer Hardware, die von vielen Industriezweigen und Regierungsbehörden erfolgreich für verschiedene Fertigungsprozesse eingesetzt wird [60]. Durch dieses Konzept

wird eine Reduktion des Ausschusses und eine Fehlerdetektion erreicht, indem Prozessmodelle, Sensordaten und statistische Modelle integriert sind. STARK ET AL. stellen 2020 den Digitalen Zwilling als eine digitale Repräsentation einer Produktinstanz (reales Gerät, Objekt, Maschine, Dienst oder immaterielles Gut) oder einer Instanz eines Produkt-Service-Systems (eines aus Produkt und zugehöriger Dienstleistung bestehenden Systems) vor [31]. Das Konzept sieht vor, dass ausgewählte Merkmale, Zustände und Verhalten der Produktinstanz oder des Systems in der digitalen Repräsentation beinhaltet sind. Informationen und Daten können so innerhalb verschiedener Lebenszyklusphasen verknüpft werden. Weiterhin wird neben dem Digitalen Zwilling der Digitale Master definiert, aus dem ein Digitaler Zwilling abgeleitet werden kann, ebenso wie der Digitale Schatten, der die Daten einer Produktinstanz und Informationen beispielsweise über seine Herstellung abbildet. Im Jahr 2023 beschreiben JAVAID ET AL. den Digitalen Zwilling als ein virtuelles Modell, das die physischen Komponenten und das Verhalten eines Internet-of-Things-Geräts in den Phasen seines Lebenszyklus dupliziert. Der Einsatz von Sensorik bildet die Grundlage des Digitalen Zwillings und ermöglicht das Sammeln von Echtzeitdaten [61].

Die vorgestellten Konzepte und Definitionen haben Schnittmengen, die zusammengefasst werden können und somit eine Beschreibung des Digitalen Zwillings für diese Dissertation liefern. Der Digitale Zwilling beinhaltet den Digitalen Master oder wird daraus abgeleitet und ist ein genaues physikalisches Abbild von einer mikroskopischen bis zu einer makroskopischen Ebene des physischen Zwillings und kann sich über mehrere Lebensphasen der Instanz erstrecken. Physikalische Modelle des physischen Zwillings wie thermische, strömungsdynamische, elastostatische oder auch statistische Modelle sind im Digitalen Zwilling integriert. Über Sensorik zum Digitalen Zwilling wird der aktuelle Zustand des physischen Zwillings aktualisiert und der Abruf von historischen Daten wird ermöglicht. Eine bidirektionale Verbindung erzeugt einen Daten- und Informationsfluss vom Digitalen Zwilling zurück zum physischen Zwilling. Digitale Zwillinge können untereinander verbunden sein und somit Flotteninformationen zur Verfügung stellen.

Anwendungsgebiete des Digitalen Zwillings

Wie bereits in der Beschreibung der verschiedenen Definitionen zu erkennen war, existieren zahlreiche Anwendungsgebiete sowie Funktionen, die durch das Konzept eines Digitalen Zwillings realisierbar sind. Die Abbildung 2-3 zeigt einige der Funktionen Digitaler Zwillinge in der Industrie 4.0:

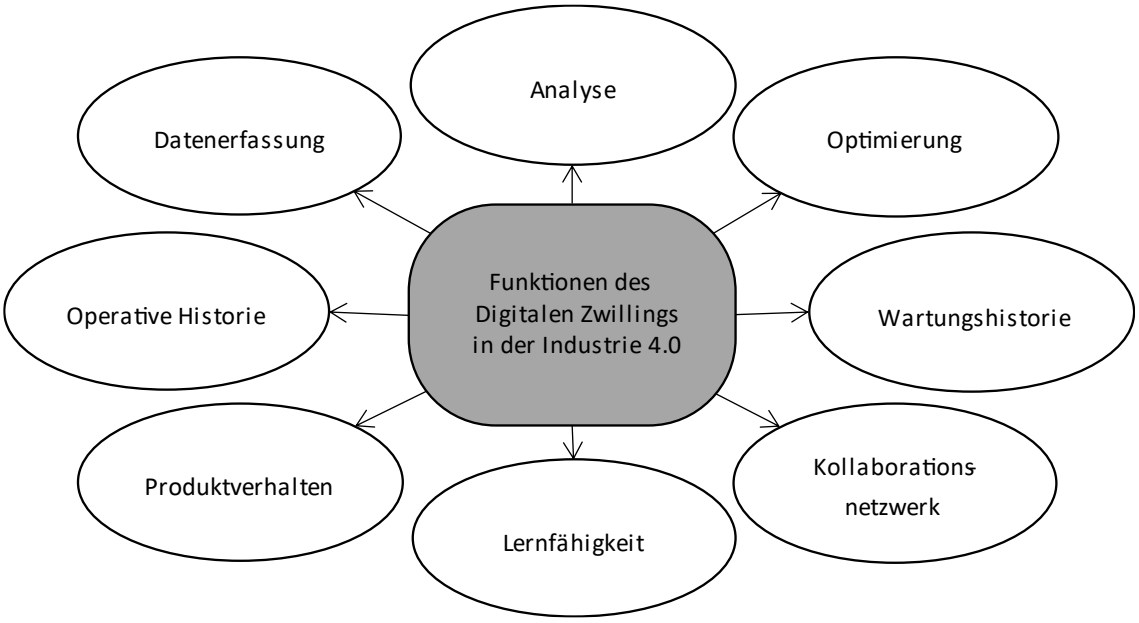


Abbildung 2-3: Funktionen des Digitalen Zwillings in der Industrie 4.0 angelehnt an [61]

Eine der wichtigsten Funktionen des Digitalen Zwillings ist die Datenerfassung über Sensorik am physischen Zwilling. Die erfassten Daten werden im Digitalen Zwilling aufbereitet und passgenaue Informationen erstellt, beispielsweise über offene Programmierschnittstellen [62]. Die Visualisierung dieser Daten kann von Dashboards über Webservices in Web-basierten Digitalen Zwillingen [63] bis hin zu Erweiterte-Realitäts-Anwendungen [64] erfolgen. Die Daten und das resultierende Systemverhalten können analysiert werden. Dies erfolgt durch Experten- und unterstützende Diagnosesysteme auf der Grundlage bewährter Verfahren und ermöglicht die Senkung der Wartungskosten, der Risiken von Ausfällen, der Stillstandszeiten sowie die Steigerung der Effizienz und Qualität der technologischen Prozesse [65].

Gewonnene Daten werden im Digitalen Zwilling weiterverarbeitet und zur Auswertung gezielter Zustandsgrößen genutzt. Solche Zustandsgrößen bzw. Systemverhalten sind beispielsweise Vibrationsanalysen von Maschinen [66], Oberflächenrauheit von Produkten [67], geometrische Parameter von Gebäuden [68] oder Toleranzanalysen [69]. Als weitere Funktion werden Optimierungen im Digitalen Zwilling durchgeführt. Diese bauen auf der Datenerfassung und -analyse auf und können beispielsweise zur Verbesserung der Leistung von Produktionslinien dienen, indem der Materialfluss optimiert wird [62]. Die Basis der Unterstützung einer kontinuierlichen Entscheidungsfindung zur Produktionsoptimierung bilden unterschiedliche Layoutvarianten der Produktion, die gegenübergestellt werden. Im Digitalen Zwilling können folglich unterschiedliche Zustände des physischen Zwillings simuliert und bewertet werden. Die Optimierung besteht in der Auswahl der für den Anwendungszweck günstigsten Variante. Im Fall von

Fahrzeugen oder Robotern können so auch Fahrwege oder Trajektorien optimiert werden [70, 71].

Eine verbreitete Anwendung von Digitalen Zwillingen ist die Wartungsvoraussage, die auf der Wartungshistorie aufbaut. Durch das Wissen aus der Historie können Rückschlüsse auf zukünftige Wartungs- und Reparaturereignisse gezogen werden. Vorausschauende Wartungsmaßnahmen können dann in Sektoren wie dem Energiesektor oder der verarbeitenden Industrie die Abschaltung einer ganzen Produktionslinie verhindern. Neben der vorausschauenden Wartung können mithilfe Digitaler Zwillinge auch reaktive, vorbeugende und zustandsorientierte Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet werden [72]. Auch die operative Historie kann zusammen mit aufgenommenen Daten einen Mehrwert generieren. So kann mittels der Kombination eine flexible Serviceplanung durch ein umfassendes Bild über den Zustand der Anlage, noch bevor ein Ausfall eintritt, erfolgen [73] oder auch eine Was-Wenn-Analyse durchgeführt werden, um individuelle Informationen zur Entscheidungshilfe und Warnungen für die Betreiber des physischen Systems zu erstellen [74].

Die Modellierung eines Produktverhaltens stellt eine weitere grundlegende Funktion Digitaler Zwillinge dar. Durch die Verknüpfung mit der Sensorik wird das Verhalten des physischen Zwillings am virtuellen Modell gespiegelt. Der Digitale Zwilling kann anschließend zur Analyse des Produkts oder Produktionsumgebungen genutzt werden, indem beispielsweise der Echtzeit-Zustand eines Shop-Floors durch 3D und 2D Visualisierungen dargestellt wird [75]. Bei Produkten, die einem Kunden zur Verfügung gestellt werden, können Informationen über das Produktverhalten über Digitale Zwillinge bereitgestellt werden, um diese Informationen anschließend im Produktdesign zu nutzen [76, 77].

Digitale Zwillinge können auch über Lernfähigkeit verfügen, um Funktionen und Anwendungen zu ergänzen. Systeme lernen durch die Nutzung von Algorithmen der Künstlichen Intelligenz und ermöglichen die bereits vorgestellte vorausschauende Wartung und Instandhaltung. Beispiele für lernende Systeme im Digitalen Zwilling sind die Nutzung von neuronalen Netzen für ein thermisches Fehlerkontrollverfahren zur Verbesserung der Bearbeitungsgenauigkeit von komplexen Teilen [78] oder die Echtzeit-Interaktion durch vorausschauende Steuerung mithilfe eines Digitalen Zwillings einer Fabrikhalle [79].

Durch die Verbreitung der Industrie 4.0 wurde die Möglichkeit geschaffen, Informationen digital zwischen unterschiedlichen Akteuren auszutauschen. Dieser Austausch von Informationen innerhalb eines Kollaborationsnetzwerks kann durch Digitale Zwillinge realisiert werden. Eine sichere Kommunikation zwischen den Digitalen Zwillingen ist unter anderem durch die Blockchain-Technologie möglich [80].

Die vorgestellten Funktionen und Anwendungen stellen nur einen Bruchteil der Möglichkeiten durch Digitale Zwillinge dar, die bereits existieren oder Gegenstand der Forschung sind. Digitale Zwillinge sind eine Schlüsseltechnologie, die eine Überschneidung vielseitiger Anwendungsgebiete erlaubt. So kann beispielsweise auch ein Servicegedanke in den Digitalen Zwilling integriert werden [81] oder Nachhaltigkeitsbetrachtungen im Digitalen Zwilling durchgeführt werden.

2.1.3 Nachhaltigkeitsbetrachtung im Digitalen Zwilling

Die Schnittmenge zwischen den Themen Nachhaltigkeit und Industrie 4.0 ist zentraler Bestandteil dieser Dissertation und wird daher in diesem Abschnitt beleuchtet. Der Digitale Zwilling als Werkzeug der Industrie 4.0 wird zur Nachhaltigkeitsbetrachtung eingesetzt und ist in der Literatur auch unter dem Synonym Nachhaltiger Digitaler Zwilling (engl. *Sustainable Digital Twin*) [82–84] oder Grüner Digitaler Zwilling (engl. *Green Digital Twin*) bzw. Digitaler Grüner Zwilling (engl. *Digital Green Twin*) [85–88] zu finden.

Digitale Zwillinge zur Nachhaltigkeitsbetrachtung besitzen einen ähnlichen Funktionsumfang wie im Unterkapitel zuvor beschrieben, da die meisten Funktionen eine Verknüpfung zu Themen der Nachhaltigkeit zulassen. So wird durch Analysen und Optimierungen von Prozessen durch Effizienzsteigerungen Energie eingespart oder durch vorausschauende Wartung und Instandhaltung ein Maschinenausfall vorgebeugt, was die Lebensdauer der Maschinen verlängert und somit Ressourcen spart. Auch Kollaborationsnetzwerke und Lieferketten nutzen Digitale Zwillinge zum Informationsaustausch und zur Zielgrößenerfüllung [89].

Es sind je nach Anwendungsfall unterschiedliche Nachhaltigkeitskenngrößen in Digitalen Zwillingen von der Energiebetrachtung [90] über Materialnutzung [91] bis zu Treibhausgasemissionen [92, 93] zu finden. Als Erweiterung werden Methoden der ökologischen Nachhaltigkeitsbetrachtung wie die Ökobilanz [94–96] oder auch Methoden der sozialen Nachhaltigkeit [97, 98] in den Digitalen Zwilling integriert. Im Fokus der Nachhaltigkeitsbetrachtung ist primär der Anfang des Produktlebenszyklus, in dem die Produktentwicklung und die Produktion stattfindet [99]. Der Grund für die häufige Verwendung zu Beginn des Produktlebenszyklus im Vergleich zu den restlichen Lebensphasen ist der meist hohe Bedarf an Ressourcen wie Energie und Material bei der Entstehung von Produkten, der somit einen großen Hebel für Nachhaltigkeitskenngrößen darstellt. Da quantifizierbare Aussagen über Nachhaltigkeit oftmals eine Betrachtung mehrerer Lebensphasen bedienen, ist eine lebensphasenüberschneidende Sichtweise ebenfalls zu finden [99].

Digitale Zwillinge besitzen diverse Funktionen und adressieren breit gefächerte Anwendungsgebiete. Daraus resultieren zahlreiche Möglichkeiten, wie Nachhaltigkeit mithilfe

Digitaler Zwillinge bewertet, analysiert und gesteigert werden kann. Die Erreichung der Ziele einer nachhaltigen Entwicklung, die durch die UNITED NATIONS 2015 veröffentlicht wurden, lässt sich durch die Anwendung Digitaler Zwillinge unterstützen [100]. Die wesentlichen Einsatzbereiche Digitaler Zwillinge, die meist mehrere Ziele im Fokus haben, sind das produzierende Gewerbe, das Bauwesen, die Stadtplanung, das Energie- und Ressourcenmanagement, die Landwirtschaft, das Gesundheitswesen und das Bildungswesen [101]. Die Vielzahl der Einsatzbereiche in unterschiedlichen Branchen erzeugt eine Assoziation zwischen den Themen Nachhaltigkeit und Digitalem Zwilling, die nicht einheitlich beschrieben werden kann. Gründe hierfür sind zum einen das bereits beschriebene Verständnis der Technologie des Digitalen Zwillings mit seinen unterschiedlichen Definitionen und zum anderen die Sichtweisen des Begriffs der Nachhaltigkeit. Von den drei Säulen der Nachhaltigkeitsbetrachtung – ökologisch, ökonomisch und sozial – wird in dieser Dissertation der Fokus auf die ökologische Nachhaltigkeit gelegt, die unter anderem durch die Kenngröße des CO_2-Fußabdrucks beschrieben werden kann.

2.2 CO_2-Fußabdruck

Der CO_2-Fußabdruck ist eine Kenngröße für die ökologische Sicht in der Nachhaltigkeitsbewertung, die durch die exklusive Gesamtmenge an direkten und indirekten Kohlenstoffdioxidemissionen von Aktivitäten oder von der Akkumulierung der Lebensphasen eines Produkts erzeugt wird [102]. Neben direkt emittiertem Kohlenstoffdioxid werden auch weitere Treibhausgase (THG) über die THG-Bilanz in Kohlenstoffdioxid – sogenannte CO_2-Äquivalente (CO_2eq) – über Äquivalenzfaktoren umgerechnet. Beispielsweise ergibt ein Kilogramm CH4 (Methan) 25 kg CO_2 bei einem Treibhauspotenzial (engl. *global warming potential – GWP*) von 100 Jahren [103]. Neben den emittierten THG werden auch der Atmosphäre entzogene THG-Mengen in der Bilanz berücksichtigt [104]. Das Gewicht der summierten CO_2-Äquivalente ergibt die physikalische Einheit des CO_2-Fußabdrucks, welcher unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten „CO_2eq-Fußabdruck“ heißen müsste.

2.2.1 Die Geschichte des CO_2-Fußabdrucks

Mit dem immer größer werdenden Verständnis über Umweltbelastungen und die begrenzte Verfügbarkeit von Ressourcen wurde seit den 1960er Jahren die methodische Betrachtung in Form der Lebenszyklusanalyse – auch Ökobilanz genannt (engl. *Life Cycle Assessment – LCA)* – immer weiter vorangetrieben [105]. Die stetige Weiterentwicklung

des LCA diente später in den 2000er Jahren als grundlegendes, methodisches Vorgehen zur Berechnung von Umweltindikatoren.

Als erstes großes internationales Ereignis zur Schaffung eines Bewusstseins der globalen Umweltprobleme gilt der 1987 veröffentlichte Bericht *Our Common Future* der World Commission on Environment and Development (WCED), welcher auch als *Brundtland-Bericht* Bekanntheit erlangte [106]. Der dort geprägte Begriff des *sustainable development* (dt. *nachhaltige Entwicklung*) beschreibt die Notwendigkeit von Strategien, die Entwicklung und Umwelt zusammen denken.

Das Bestreben der WCED wurde 1996 durch die Normreihe ISO 14000 bzw. der Veröffentlichung der ISO 14001 manifestiert, welche das Gleichgewicht zwischen Ökonomie und Ökologie als internationale Umweltmanagementnorm beschreibt. [107].

Unabhängig der Entwicklung der Normenreihe beschrieben REES UND WACKERNAGEL bereits 1992 zum ersten Mal einen Umweltindikator als „Fußabdruck“ [108]. Der dort veröffentlichte Begriff des „Ökologischen Fußabdrucks“ stellte eine direkte Verrechnung zwischen anthropogenen CO_2-Emissionen und einer benötigten, biologisch aktiven Fläche zur Kompensation dar, wie es die Abbildung 2-4 verbildlicht. Diese Fläche besteht aus dem Land, welches zur Produktion von Energie, Nahrung und Forstprodukten benötigt wird sowie der genutzten Fläche, die bebaut wurde. Mit dem neu entwickelten Ansatz wurde die Idee verfolgt, eine Relation zwischen anthropogenem Handeln und der ökologischen Umwelt in einer quantifizierbaren Größe zu erzeugen.

Abbildung 2-4: Der Ökologische Fußabdruck. Illustration aus 1996 [108]

Der nächste Meilenstein in der Geschichte des CO_2-Fußabdrucks wurde 2001 durch die Gründung der „Carbon Trust Initiative“ erreicht. Die von der britischen Regierung gegründete Initiative wirkte bei der Entwicklung des ersten Standards zum CO_2-Fußabdruck im Jahr 2008 in Kooperation mit dem britischen Umweltministerium und der British Standards Institution (BSI) mit. Der Standard „Specification for the assessment of

the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services“ gilt als erster Versuch eines einheitlichen methodischen Vorgehens zur Ermittlung des CO_2-Fußabdrucks, indem dort Richtlinien zur Anwendung eines LCA genannt werden [109].

Im gleichen Jahr der Veröffentlichung der britischen Norm wurde in Deutschland ein Pilotprojekt gegründet. Das Ziel des „PCF Pilotprojekt Deutschland“ unter der Trägerschaft des World Wide Fund for Nature (WWF), des Öko-Instituts, des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) und THEMA1 war die Erstellung einer branchen- und stakeholderübergreifenden Plattform [110]. In diesem Pilotprojekt wurden 15 Produkte und Dienstleistungen bilanziert und dabei die Möglichkeiten und Hemmnisse ermittelt. Der verwendetet Begriff des Product Carbon Footprint (PCF) findet dort zum ersten Mal Anwendung und wird in dieser Form bis heute in einer Vielzahl von Veröffentlichungen verwendet – auch im deutschen Sprachgebrauch [111]. Im Anschluss an das Pilotprojekt wurde das „PCF World Forum“ als Initiative von THEMA1 unter Mitwirkung der Heinrich Böll Stiftung und der Europäischen Kommission gegründet und veranstaltete von 2009 bis 2012 Summits in Berlin zum internationalen Austausch über Anwendung, Normen und Herausforderungen des CO_2-Fußabdrucks mit einer anschließenden Studie im Jahr 2012 unter deutschen kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) [112].

International betrachtet erschien die bekannteste Veröffentlichung zur Bilanzierung von Umweltdaten 2001 durch die erste Version des Greenhouse-Gas-Protocol (GHG-Protocol), welches die Unternehmesbilanzierung adressiert [113]. Das World Business Council for Sustainable Development verfolgte damit das Ziel, einen einheitlichen Industriestandard zu schaffen. Das GHG-Protocol ist seither weit verbreitet und teilt Emissionen in drei verschiedene Geltungsbereiche auf: direkte Emissionen (Scope 1), indirekte Emissionen aus der Erzeugung von zugekaufter Energie (Scope 2) und indirekte Emissionen, die in der Wertschöpfungskette des berichtenden Unternehmens auftreten (Scope 3).

Als Ergänzung in der Normreihe ISO 14000 wurde 2018 die ISO 14067 „Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung“ veröffentlicht [104]. Diese Norm bezieht sich konkret auf die Quantifizierung des CO_2-Fußabdrucks von Produkten als Spezifizierung der allgemeinen Ökobilanz und legt damit die grundlegende Methode des heutigen verwendeten CO_2-Fußabdrucks als Indikator der ökologischen Nachhaltigkeit fest.

2.2.2 Differenzierung der Begrifflichkeiten

Der CO_2-Fußabdruck ist unter verschiedenen Begriffen zu finden. Neben dem bereits erwähnten „Ökologischen Fußabdruck“ (engl. *ecological footprint*) [114], der die zu kompensierende Fläche aus verschiedenen Ursachen als Fokus hat, ist der geläufigste Begriff

der „CO_2-Fußabdruck“ (engl. *carbon footprint*) [102] und bezeichnet die emittierte Menge an THG über eine definierte Zeitspanne. Der Indikator wird je nach Sichtweise unterschiedlich bezeichnet. So ist der CO_2-Fußabdruck eines Unternehmens als Corporate Carbon Footprint (CCF) bekannt, der sich aus der Relevanz über ein Verständnis der unternehmensweiten CO_2-Emissionen durch die steigende CO_2-Bepreisung begründet [115]. Weiter können auch Bilanzierungen über Personen, Haushalte, Städte, Regionen und Länder als Spezifizierung des CO_2-Fußabdrucks gefunden werden, die zwar seltener aber mit zunehmender Häufigkeit anzutreffen sind [115]. Am bekanntesten ist der CO_2-Fußabdruck von Produkten, der auch Gegenstand dieser Dissertation ist. Er ist international unter dem Begriff PCF – Product Carbon Footprint geläufig. In der zugeordneten Norm ist er allerdings unter der Abkürzung CFP – Carbon Footprint of Products – definiert [104]. Da diese Abkürzung ausschließlich in der Norm und nicht im allgemeinen wissenschaftlichen Terminus anzutreffen ist, wird in dieser Dissertation der Begriff des PCF verwendet.

Neben dem PCF aus der Produktsicht ist der TCF – Transport Carbon Footprint – ein Indikator, der im Transportsektor Anwendung findet [116]. Da der Transport von Produkten direkten Einfluss auf den PCF hat, zeigt sich hier ein Beispiel für die Unterscheidung der einzelnen Sichten des CO_2-Fußabdrucks. Ein weiteres Feld, welches zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist die Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden. Die Ökobilanz-Methodik mit Rechenregeln zu diesem speziellen Typ ist in der DIN EN 15804 definiert [117].

Eine andere Strategie zu Umweltauswirkungen von Produkten und Organisationen wird von der Europäischen Kommission angewendet. Der PEF – Product Environmental Footprint – und der OEF – Organisational Environmental Footprint – sollen als multikriterielle Kenngrößen und zukünftig auch in der Kommunikation zu Verbrauchern genutzt werden [118, 119]. Die simultane Veröffentlichung beider Richtlinien soll Synergieeffekte der beiden Methoden fördern. Als Differenzierungskriterium zum PCF umfasst der PEF statt der Wirkungskategorie Klimawandel insgesamt 15 Wirkungskategorien. Diese werden über eine Normalisierung und eine anschließende Gewichtung zu einem einzelnen Indikator verrechnet [120]. Kritik an dieser Methode begründet sich in der Berechnung der Normalisierungs- und Gewichtsfaktoren, die keine allgemeingültige Repräsentanz abbilden und daher Anpassungen bedürfen [121].

2.2.3 Produktsicht des CO_2-Fußabdrucks

In der Norm ISO 14067 wird der CO_2-Fußabdruck von Produkten (PCF) definiert und ist dabei in die Ermittlung des PCF je funktioneller Einheit oder des partiellen PCF (pPCF) je

deklarierter Einheit unterteilt [104]. Ein Ziel der Produktsicht auf den CO_2-Fußabdruck ist es, das Verständnis über die THG-Bilanz zu fördern und daraus Maßnahmen zur Reduzierung von emittierten THG-Mengen während des Produktlebenswegs abzuleiten. Der PCF kann auf die Phasen des Produktlebenszyklus (PLZ) oder einzelne Prozesse aufgeteilt werden und ist als pPCF definiert [104]. Im PCF-Bericht bzw. der PCF-Studie wird die Einheit entsprechend dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen eindeutig festgelegt. Im Falle des pPCF ist dies die deklarierte Einheit, wie beispielsweise ein Kilogramm Stahl. Im Gegensatz dazu steht die funktionelle Einheit, welche sich eignet, um unterschiedliche Produkte mit identischer Funktion miteinander zu vergleichen. Eine weitere Unterteilung erfolgt in der Aufschlüsselung der emittierten und entzogenen THG-Mengen. Für spezifische emittierte und entzogene THG-Mengen gelten definierte Anforderungen zur Berücksichtigung in der PCF-Studie, wie beispielsweise aus fossilen und biogenen Rohstoffen berücksichtigte THG-Mengen. Zur Behandlung dieser Spezialfälle ist an dieser Stelle auf die Norm ISO 14067 verwiesen [104].

Da bei der Quantifizierung des PCF oftmals spezifische Rahmenbedingungen gesetzt werden, können Produktkategorieregeln angewendet werden. Diese umfassen Regeln, Anforderungen und Leitlinien zur Quantifizierung und Kommunikation des PCF. Die spezifischen Anforderungen gelten beispielsweise, wenn der PCF für einen Vergleich genutzt werden soll. Der PCF der vergleichenden Produkte berechnet sich nach identischen Anforderungen an die Quantifizierung und muss den vollständigen Lebensweg umfassen. Außerdem müssen die Produktkategorieregeln der ISO 14027 entsprechen [122].

Darüber hinaus kann ein systematischer PCF Ansatz entwickelt werden. Dieser soll die Komplexität der Durchführung einer PCF-Studie bei weiteren Produkten innerhalb derselben Organisation verringern, indem Verfahrenssätze mehrfach genutzt werden. Die Anforderungen an den systematischen PCF Ansatz sind in der ISO 14067 zu finden [104].

Das Ziel den PCF zu berechnen, kann in unterschiedlicher Motivation begründet sein. Ein Ziel ist der Vergleich zu anderen Produkten wie einem internen Vorgängerprodukt oder einem Konkurrenzprodukt. Aufgrund der Natur der Berechnungsmethodik unterliegt der Endwert Rahmenbedingungen und Unsicherheiten, die zugunsten eines Produkts auslegbar sind. Um ein solches „Greenwashing“ zu umgehen, existieren Kommunikationsrichtlinien für Fußabdrücke von Produkten [123]. Damit wird sichergestellt, dass nur wissenschaftlich fundierte Informationen kommuniziert werden. Wie solche Informationsmodule gestaltet sein sollen, regelt die ISO 14025 [124]. Bei der Veröffentlichung von Fußabdruck-Informationen muss außerdem darauf geachtet werden, dass eine verglei-

chende Kommunikation nur innerhalb des Anwendungsbereiches der Bilanzierungsmethode liegen darf. Eine Aussage, die ein Produkt im Vergleich zu einem anderen Produkt als „besser für die Umwelt“ deklariert, ist nicht zulässig [123]. Die Basis der Vergleichbarkeit von Produkten bildet die Nutzung einer einheitlichen Berechnungsmethodik, welche im Folgenden beschrieben wird.

2.2.4 Ökobilanz

Die Berechnungsgrundlage des PCF erfolgt durch die Anwendung der Ökobilanz-Methode. Die Norm ISO 14040 definiert dazu die Grundsätze und Rahmenbedingungen [125], welche durch die Norm ISO 14044 mit Anforderungen und Anleitungen ergänzt wird [5]. Die englische Bezeichnung lautet Life Cycle Assessment (LCA) und ist ebenfalls im deutschen Sprachgebrauch geläufig. Die wörtliche Übersetzung Lebenszyklusanalyse, die sich nicht für die deutsche Norm durchgesetzt hat, findet vereinzelt Anwendung [126].

Grundlegend wird eine Ökobilanz in vier Phasen aufgeteilt, die in der Abbildung 2-5 zu sehen sind: Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung.

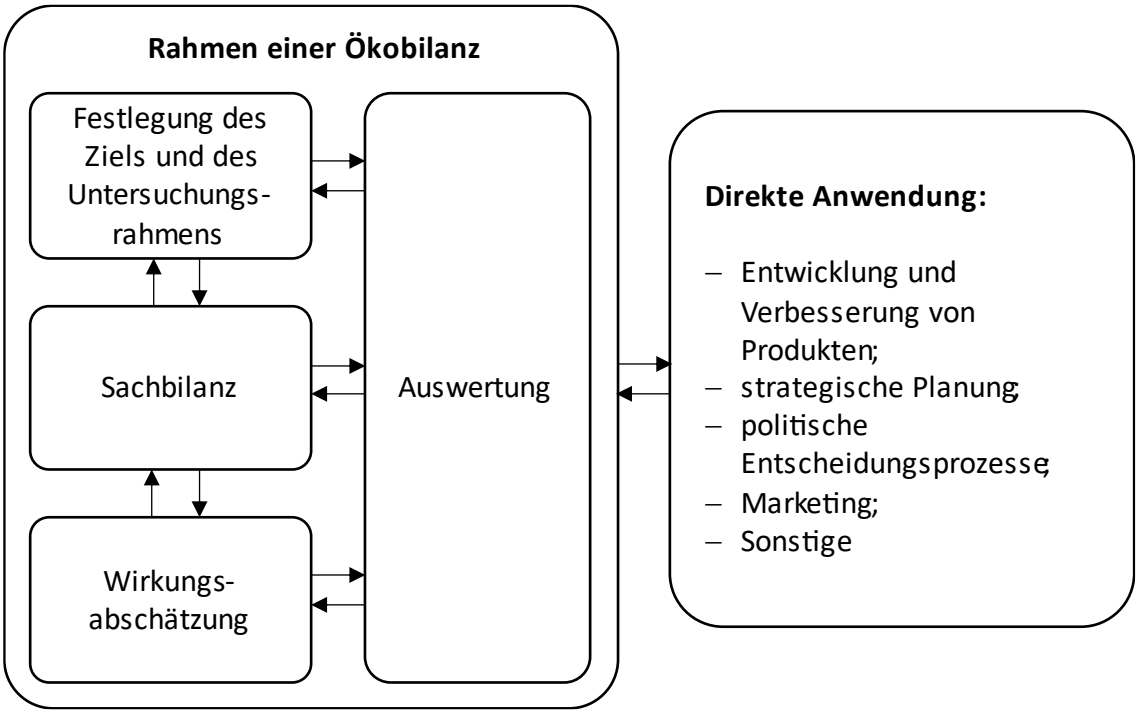


Abbildung 2-5: Vier Phasen einer Ökobilanz [125]

Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens: Im ersten Abschnitt der Methodik wird die beabsichtigte Anwendung angegeben und die Durchführung der Studie begründet. Weiterhin sind der Adressat bzw. die Zielgruppe zu benennen ebenso wie die

beabsichtigte Verwendung, beispielsweise für vergleichende Aussagen in Veröffentlichungen. Der Untersuchungsrahmen definiert das zu untersuchende Produktsystem und dessen Funktionen. Er enthält außerdem die funktionelle Einheit die Systemgrenze, das Allokationsverfahren und die verwendeten Wirkungskategorien. Darüber hinaus sind im Untersuchungsrahmen Anforderungen an Daten und Datenqualität, getroffene Annahmen und Einschränkungen sowie die Art der kritischen Prüfung und der Aufbau der Studie enthalten.

Sachbilanz: In der Sachbilanz werden die Ein- und Ausgangsflüsse des zu untersuchenden (Produkt-)Systems quantifiziert und gegenübergestellt. Sie ist ein deskriptives Modell ohne Wertung und durchläuft bei der Erstellung Iterationen, da während der Datensammlung neue Datenanforderungen oder Einschränkungen festgestellt werden. Aufgrund dieser Iterationen können außerdem durch Anpassungen des Ziels oder des Untersuchungsrahmens Änderungen entstehen.

Wirkungsabschätzung: Um potentielle Umweltwirkungen des (Produkt-)Systems abzuleiten, werden die Sachbilanzdaten mit spezifischen Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren verknüpft. Nach der Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen findet eine Klassifizierung statt, indem die Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden. Die Charakterisierung erfolgt durch die Berechnung der Wirkungsindikatorwerte. Optional können die berechneten Werte in Bezug zu einem Referenzwert normiert, geordnet und gewichtet werden.

Auswertung: In der Auswertungsphase werden die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung gegenübergestellt. Hieraus lassen sich Schlussfolgerungen und Empfehlungen in Bezug zum festgelegten Ziel ableiten. Es muss beachtet werden, dass der relative Ansatz der Wirkungsabschätzung keine tatsächlichen Wirkungen auf die Ökologie voraussagt, sondern nur eine Tendenz wiederspiegeln kann. Aussagen über Wirkungsendpunkte, Grenzwertüberschreitungen oder Gefahren sind somit gegenstandlos.

In der praktischen Anwendung der Ökobilanz werden Ökodatenbanken verwendet. Diese bieten den Vorteil, dass bereits vorbilanzierte Sachbilanzdaten hinterlegt sind. Die deklarierte Einheit wie beispielsweise ein Kilogramm Masse kann im Prozess gemessen werden und mittels der in der Ökodatenbanken hinterlegten Einträge und Berechnungsmethoden ein Ergebnis erzielt werden. Der Zugang zu solchen Datenbanken erfolgt meist über eine externe Ökobilanz-Software.

Ergänzend zur Ökobilanz veröffentlichte die Europäische Kommission Handbücher zur Unterstützung einer Durchführung. Diese umfassen einen allgemein gültigen, detaillier-

ten, technischen Ökobilanz-Leitfaden zum Planen, Entwickeln und Berichten von Lebensphasen-Emissionen und dem Inventar des Ressourcenverbrauchs [127] sowie ein Ökobilanz-Kochbuch [128]. Die Wirkungskategorien und deren Beziehungen werden genauer in einem weiteren Leitfaden beleuchtet [129]: Aus den 14 Mittelpunktkategorien Klimawandel, Ozonabbau, Humantoxizität, ionisierte Strahlung, photochemische Ozonbildung, Feinstaub, Versauerung, Eutrophierung, Ökotoxizität, Landnutzung, Unfälle, Lärm, Ressourcennutzung und Austrocknung lassen sich die drei Endpunktkategorien menschliche Gesundheit, natürliche Umwelt und natürliche Ressourcen errechnen. Die menschliche Gesundheit als Endpunktkategorie lässt sich mit dem DALY-Konzept (Disability Adjusted Life Years, dt. *verlorene gesunde Lebensjahre*) nach MURRAY UND LOPEZ [130] beschreiben, indem die Auswirkungen von Umweltstressoren auf die menschliche Gesundheit in Ökobilanzen bewertet werden [131].

Die genannten Mittelpunktkategorien und Endpunktkategorien sind nicht standardisiert. Es existieren zahlreiche Berechnungsmethoden der Wirkungskategorien, die sich in Anzahl und Namen der Kategorien sowie in deren Berechnungslogik unterscheiden.

Aus den Leitfäden lassen sich zudem auch Empfehlungen ableiten, wie das Verwenden des GWP 100 bei der Mittelpunktkategorie Klimawandel [132]. Diese Mittelpunktkategorie wird angewendet, um die emittierten THG in CO_2-Äquivalente umzurechnen – der Kennzahl des CO_2-Fußabdrucks. Genauer betrachtet wird für den CO_2-Fußabdruck die Ökobilanz komprimiert angewendet. Aus der aufgestellten Sachbilanz lassen sich neben dem CO_2-Fußabdruck mit geringem Rechenaufwand weitere Mittelpunktkategorien berechnen.

2.2.5 Übersicht über Normen und Leitfäden

Neben den bereits erwähnten Methoden des GHG-Protocol, der ISO 14040 Reihe und den Leitfäden der Europäischen Kommission zum CO_2-Fußabdruck existieren weitere Dokumente, die einen spezifischen Sektor adressieren oder eine Unterstützung zur Kommunikation anbieten. Die Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über aktuelle Dokumente:

Tabelle 2-1: Übersicht von Standards, Normen und Leitfäden

Name	Beschreibung	Quelle
GHG Protocol	Bilanzierungsstandard für Treibhausgasemissionen	[113]
ISO 14026	Grundsätze, Anforderungen und Richtlinien für die Kommunikation von Fußabdruckinformationen	[123]

Name	Beschreibung	Quelle
ISO 14040	Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen	[125]
ISO 14044	Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen	[5]
ISO 14067	Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung	[104]
ILCD Handbook 1	Allgemeiner Leitfaden zur Ökobilanz: detaillierte Anleitung	[127]
ILCD Handbook 2	Allgemeiner Leitfaden zur Ökobilanz: Maßnahmen und Handlungsschritte	[128]
ILCD Handbook 3	Rahmen und Anforderungen für Modelle und Indikatoren der Ökobilanz	[129]
Amtsblatt EU	Empfehlungen zum PEF und OEF	[118]
EN 15804	Grundregeln für die Produktkategorie von Bauprodukte	[117]
IEC TS 63058	Schaltgeräte und Schaltanlagen sowie deren Baugruppen für Niederspannung – Umweltaspekte	[133]
IEC 63366	Produktkategorieregeln für die Ökobilanz von elektrischen und elektronischen Produkten und Systemen	[134]
PEP Ecopassport	Produktausweis, mit dem der ökologische Fußabdruck von elektrischen, elektronischen und klimatechnischen Anlagen beschrieben wird	[135]
Digital Product Passport	Definition eines Datensatzes auf dem gesamten PLZ, z. B. für PEF oder PCF	[136, 137]
PACT Pathfinder Framework	Leitfaden für die Bilanzierung und den Austausch von Produktlebenszyklusemissionen	[8]
Asset Administration Shell	Submodul der Asset Administration Shell (dt. *Verwaltungsschale*) für den PCF	[138]
VDMA Guideline	Berechnung des PCF im Maschinen- und Anlagenbau	[139]
TfS Guideline	Berechnung des PCF und CCF in der Chemieindustrie	[140]

Name	Beschreibung	Quelle
Catena-X Product Carbon Footprint Rulebook	Regelwerk für die Berechnung des PCF im Rahmen des Catena-X Automotive Network	[141]

Die zahlreichen Beispiele für Standards, Normen und Leitfäden zeigen nicht nur die Komplexität der Thematik des CO_2-Fußabdrucks, sie sorgen auch für ein Überangebot an Informationen. In den Leitfäden sind unterschiedliche Empfehlungen für die Herangehensweise und Rahmenbedingungen gegeben, was dazu führt, dass Produkte keine vergleichbare Basis besitzen. Es existieren bereits Ansätze, wie eine Vergleichbarkeit in Einzelfällen gewährleistet werden kann [142]. Darüber hinaus gibt es Bestrebungen, den CO_2-Fußabdruck zu zertifizieren, wie beispielsweise durch die Carbon Trust Initiative oder den TÜV Süd [143]. Dennoch weist die Berechnungsgrundlage großen Spielraum in der Durchführung auf.

Wie in diesem Kapitel dargelegt wurde, können in der Berechnung des CO_2-Fußabdrucks Randbedingungen unterschiedlich aufgestellt werden. Dies kann zu einer intransparenten und fehlerbehafteten Kommunikation führen. Um die Qualität der Berechnung als Kommunikationsgrundlage zu beschreiben, wird im folgenden Kapitel auf die Grundlagen des Qualitätsmanagements eingegangen.

2.3 Qualitätsmanagement

Das Qualitätsmanagement setzt qualitätsbezogene Ziele, verfolgt diese und wird dabei als Untermenge des Unternehmensmanagements verstanden [144]. Im Rahmen des Qualitätsmanagements werden Tätigkeiten durchgeführt, die zum Erreichen der gewünschten Ergebnisse erforderlich sind und es werden dabei in Wechselwirkung stehende Prozesse und Ressourcen gesteuert [145]. Die Normreihe ISO 9000 gibt ein Rahmenwerk für die Erstellung von Qualitätsmanagementsystemen vor. Gründe für die Einführung eines Qualitätsmanagements können der globale Wettbewerb und steigende Kundenerwartungen sein [146].

Im Kontext dieser Dissertation ist die Bewertung der Datenqualität als Teildisziplin des Qualitätsmanagements von zentraler Bedeutung. Ebenso stellen die Berechnung und Bewertung der Unsicherheit bei der Ermittlung von CO_2-Fußabdrücken eine Herausforderung dar. Daher werden diese beiden Themen zunächst grundlegend beschrieben. Im Anschluss folgt eine Vorstellung der FMEA, die in dieser Dissertation als Werkzeug des Qualitätsmanagements in adaptierter Form Anwendung findet. Anschließend wird das

Konzept der Datenprovenienz als methodische Umsetzung einer Herkunftsanalyse von Daten eingeführt.

2.3.1 Datenqualität

Die Verfügbarkeit von Daten ist die Grundlage der meisten Verbesserungen [147]. Allerdings können Daten für definierte Ziele ausschließlich unter der Bedingung genutzt werden, dass eine ausreichende Datenqualität vorliegt, da Ergebnisse und Schlussfolgerungen sonst verfälscht werden. Es ergibt sich die Notwendigkeit, die Datenqualität zu untersuchen und zu beschreiben.

Die Datenqualität wird mit dem Begriff der Informationsqualität synonym verwendet, obwohl grundlegende Unterschiede zwischen den Begriffen bestehen [148]. Daten werden unter Zugabe eines Kontextes zu formellen Informationen und bekommen mit diesem Kontext einen Wert beigefügt, indem sie mit einem Zweck innerhalb eines Bezugssystems assoziiert werden. Die Beurteilung von Datenqualität kann demnach nur unter Nennung der Daten mit dem Kontext stattfinden [148]. Allgemein betrachtet kann die Datenqualität in unterschiedlichen Dimensionen beschrieben werden. Die 15 wichtigsten Dimensionen sind demnach [149, 150]: Glaubwürdigkeit, Wertschöpfung, Relevanz, Fehlerfreiheit, Interpretierbarkeit, Verständlichkeit, Zugreifbarkeit, Objektivität, Aktualität, Vollständigkeit, hohes Ansehen, eindeutige Darstellung, Bearbeitbarkeit, einheitliche Darstellung und angemessener Umfang. So kann beispielsweise die Glaubwürdigkeit beschrieben werden, indem Daten oder Informationen mit einem Zertifikat versehen werden, welches einen hohen Qualitätsstandard ausweist [151]. Da die Bewertung von Datenqualität stets kontextabhängig ist, soll diese im weiteren Verlauf in Bezug auf den CO_2-Fußabdruck oder allgemeiner betrachtet die Ökobilanz erfolgen. Die Abbildung 2-6 zeigt den Zusammenhang zwischen Datenqualität und der Ökobilanz:

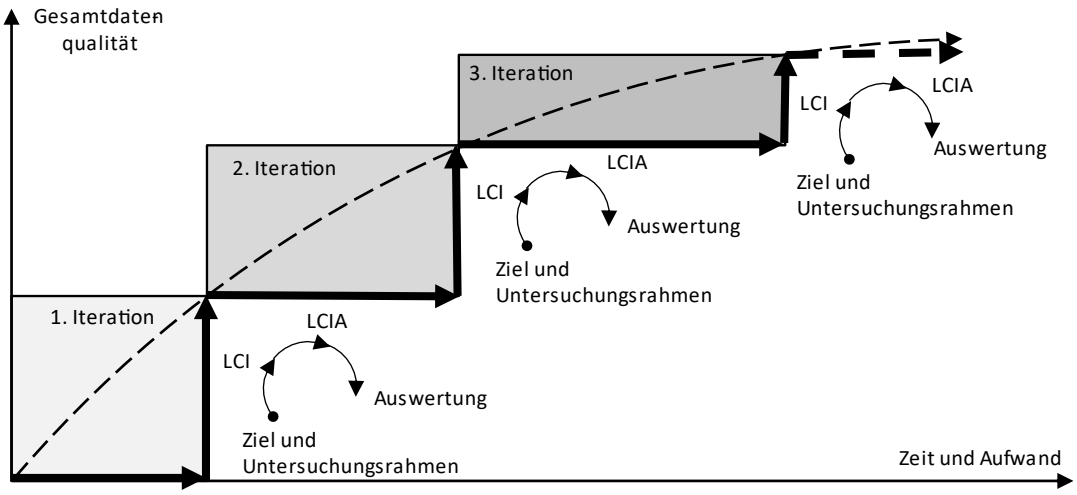


Abbildung 2-6: Zusammenhang zwischen Datenqualität und Zeit und Aufwand in der Ökobilanz nach [127]

Die Ökobilanz wird in der Regel mit einem iterativen Ansatz durchgeführt, indem Sensitivitäts- und Konsistenzuntersuchungen in der Evaluationsphase nach jeder Iteration stattfinden. Die Abbildung 2-6 zeigt einen deutlichen Anstieg der Gesamtdatenqualität mit der Durchführung weiterer Iterationen, da mehr Informationen über die beteiligten Prozesse vorhanden sind und die Daten gezielter gesammelt werden können. Die Datenqualität wird in diesem Beispiel mit Richtigkeit, Präzision und Vollständigkeit beschrieben und ist ein essentieller Bestandteil bei der Beurteilung von Ökobilanzen. Es existieren Ansätze, wie die Datenqualität quantifiziert werden kann, um Ergebnisse vergleichbar zu machen. Ein Ansatz ist die Berechnung sogenannter Datenqualitätsindikatoren [152]. Es können Indikatoren für definierte Teildisziplinen berechnet werden, die zu einem Datenqualitätsrating (engl. *Data Quality Rating – DQR*) zusammengefasst werden [127]:

$$DQR = \frac{TeR + GR + TiR + C + P + M + X_w \cdot 4}{i + 4} \tag{2-1}$$

Die Kennzahl DQR setzt sich aus den Indikatoren der technologischen Repräsentativität (TeR), der geographischen Repräsentativität (GR), der zeitbezogenen Repräsentativität (TiR), der Vollständigkeit (C) und der Präzision bzw. der Unsicherheit (P) und der methodischen Korrektheit und Konsistenz (M) zusammen. X_w beschreibt die niedrigste erreichte Qualitätsstufe (d. h. höchster numerischer Wert) der Datenqualitätsindikatoren und i die Anzahl der zutreffenden Datenqualitätsindikatoren. Das Ergebnis des DQR wird in die drei Stufen „Hohe Qualität“ (≥1,6), „Basisqualität (>1,6 bis ≥3) und „Datenschätzung“ (>3 bis ≥4) unterteilt. Zur Ermittlung der Indikatoren sei auf [127] verwiesen. Die vorgestellte Formel zur Berechnung der Kennzahl DQR ist ein Beispiel der Quantifizierung der Datenqualität im Kontext der Ökobilanz und besitzt keine allgemeine Gültigkeit.

Die Ermittlung der Indikatoren beruht teilweise auf der subjektiven Einschätzung des Durchführenden der Ökobilanz. Für die Unsicherheit (P) in der Formel können Metriken herangezogen werden, die eine genaue und objektive Beschreibung ermöglichen. Die Berechnung der Unsicherheit wird in dieser Arbeit als zentrales Werkzeug genutzt und soll daher im Folgenden genauer beschrieben werden.

2.3.2 Unsicherheit

Nach PELZ ET AL. kann Unsicherheit beherrscht werden, wenn sie beschrieben, quantifiziert und evaluiert wird [153]. Dabei wird Unsicherheit im technischen Kontext verstanden als ein mit dem Ergebnis einer Messung verbundener Parameter, welcher die Streuung der Werte charakterisiert und begründet auf die Messgröße zurückgeführt werden kann [154]. Unsicherheiten können allerdings nicht nur bei Messungen entstehen, sondern auch bei der Weiterverarbeitung von Daten oder bei der Modellbildung. Allgemein werden Unsicherheiten beschrieben, indem sie mit einer Datenbasis mit Unsicherheitsverteilung referenziert werden, welche für das untersuchte Modell gilt. Informationen der Unsicherheit werden dabei in drei Gruppen eingeteilt [155]:

1) die Größe der Unsicherheit und ihre Wahrscheinlichkeitsverteilung
2) Modellparameter, die in die Analyse miteinbezogen wurden
3) Zuordnung der Modellparameter zu besonderen Unsicherheitsattributen

Unsicherheit wird in technischen Systemen unterschiedlich kategorisiert. BEVINGTON ET AL. beschreiben die Unsicherheit in der naturwissenschaftlichen Forschung mit den beiden Klassen der systematischen und zufälligen Fehler [156]. In ausführlichere Kategorien wird die Unsicherheit von MORGAN ET AL. mit statistischer Variation, subjektivem Urteil, sprachlicher Ungenauigkeit, Variabilität, inhärenter Zufälligkeit, Nichtübereinstimmung und Annäherung unterteilt [157]. Eine Unterteilung in drei Kategorien kann durch die Klassen Datenunsicherheit, Modellunsicherheit und strukturelle Unsicherheit bei PELZ ET AL. [153] oder Vollständigkeitsunsicherheit als dritte Klasse bei FUNTOWICZ UND RAVETZ [158] vorgenommen werden. Überschneiden sich die Konfidenzintervalle von Werten aus verschiedenen redundanten Datenquellen nicht, so stehen diese im Widerspruch zueinander und es wird von Daten-indizierten Konflikten gesprochen, die zu Daten- oder Modellunsicherheit führen [153].

Bei der Größe der Unsicherheiten und ihrer Wahrscheinlichkeitsverteilung sind die Begrifflichkeiten Genauigkeit, Präzision und Richtigkeit zu differenzieren. Genauigkeit in einer Messung wird dann erreicht, wenn sie präzise und richtig ist [159]. Präzision und Richtigkeit lassen sich anhand der Abbildung 2-7 veranschaulichen:

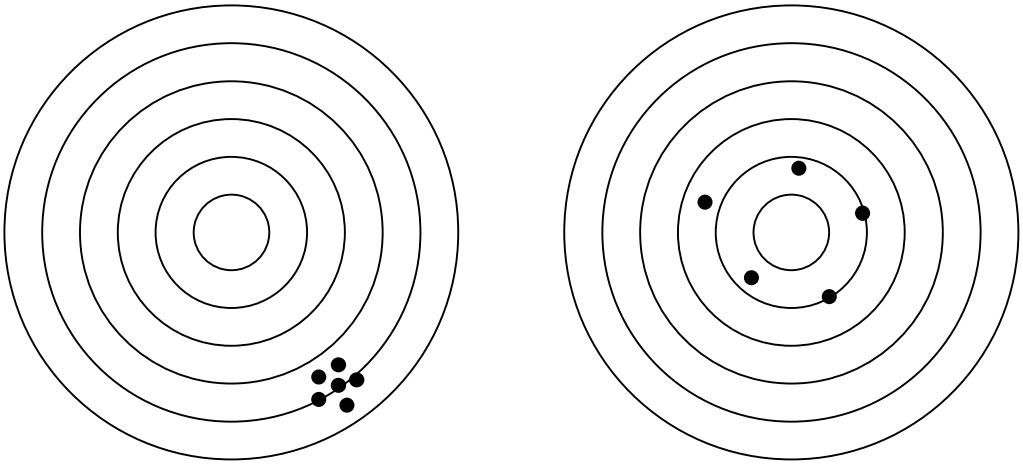


Abbildung 2-7: Hohe Präzision, niedrige Richtigkeit (links) und hohe Richtigkeit, niedrige Präzision (rechts)

Die Präzision einer Messung gibt an, wie nahe Messungen eines identischen Messziels bei Wiederholung beieinander liegen. Im Beispiel der linken Dartscheibe ist eine hohe Präzision zu beobachten, da die Pfeile eine geringe Abweichung voneinander aufweisen. Dabei spielt die Position auf der Dartscheibe keine Rolle. Die Position auf der Dartscheibe ist dann relevant, wenn die Richtigkeit des Wertes analysiert werden soll. Für die Richtigkeit muss ein Referenzwert festgelegt werden. Im Falle der Dartscheibe kann dies der Mittelpunkt sein.

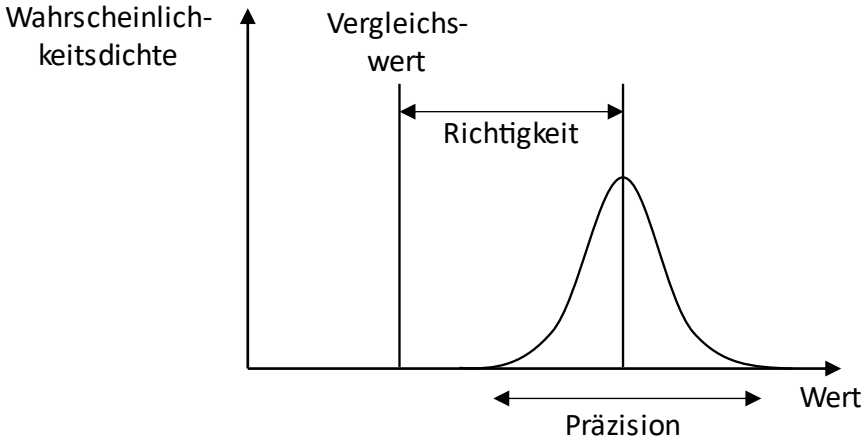


Abbildung 2-8: Konzept von Präzision und Richtigkeit

Die Kombination aus Richtigkeit mit einem Vergleichswert und der Präzision ist anhand der Abbildung 2-8 zu sehen. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung kann dazu genutzt werden, um den Wert der Richtigkeit mit einem Unsicherheitsbereich zu ergänzen. Dabei ist zu beachten, dass die Kennzeichnung der Messunsicherheit am wahren Wert ansetzt und nicht am Streuzentrum [160].

Gaußsche Fehlerfortpflanzung

Eine Untersuchung der Gaußschen Fehlerfortpflanzung (FFP) wird dann durchgeführt, wenn Unsicherheiten weiter verrechnet werden. Der Begriff der FFP ist dabei irreführend, da hier die Fortpflanzung von Unsicherheiten gemeint ist. Früher wurde der Begriff des Fehlers für Messabweichungen verwendet [161]. Eine Berechnung der resultierenden Unsicherheit u kann mit folgender Gleichung bei unkorrelierten Eingangsgrößen x_i bestimmt werden [161]:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \qquad 2\text{-}2$$

Hierbei ist y das Messergebnis und $\partial f / \partial x_i$ die partielle Ableitung der Modellfunktion f nach der Größe x_i mit eingesetzten Schätzwerten x_1 bis x_m. Für weitere Erklärungen und Spezialfälle sei an dieser Stelle auf die Normenreihe ISO 1319 verwiesen [162].

Monte-Carlo-Simulation

Die Untersuchung der Unsicherheit bei Ökobilanzen ist herausfordernd, da eine Vielzahl an Faktoren miteinander verrechnet wird. Eine beliebte Methode, um die Unsicherheit bei Ökobilanzen zu ermitteln, stellt die Monte-Carlo-Simulation (MCS) dar [163–165]. Bei der MCS handelt es sich im Wesentlichen um die Erzeugung von Zufallsstichproben mithilfe von computergenerierten Zufallsexperimenten [166]. Sie wird eingesetzt, um aufwändig lösbare oder gar analytisch unlösbare Probleme numerisch zu lösen, indem gezogene Stichproben einen Ergebnisraum simulieren. Die Methodik hinter der MCS ist das Gesetz der großen Zahlen: Ein Wert auf Basis eines Zufallsexperiments der berechneten Zielgröße strebt mit zunehmender Anzahl der Simulationsdurchläufe gegen den wahren Wert der Zielgröße [167]. Das Vorgehen einer MCS kann durch fünf Phasen beschrieben werden [168]: In der ersten Phase werden die Zufallszahlen für die Simulation erzeugt und anschließend in der zweiten Phase in die benötigte Verteilung umgewandelt. Das Durchführen eines Schrittes einer MCS gemäß den gezogenen Zufallszahlen und der dahinterliegenden Verteilung folgt in der dritten Phase mit anschließender Wiederholung der Schritte eins, zwei und drei bis eine ausreichende Anzahl an Simulationen generiert wurde. Das Ziel ist die Ableitung einer stabilen Verteilung und Statistik. In der fünften Phase findet eine Endauswertung statt, indem Mittelwerte der gemessen Größe und die statistischen Fehler gebildet werden. Ein Anwendungsbeispiel der MCS ist die Bestimmung der Fläche einer beliebigen geschlossenen Figur. Die Figur wird auf ein Quadrat mit der Seitenlänge eins eingezeichnet und es werden anschließend Zufallskoordinaten innerhalb des Quadrates generiert. Bei der Positionierung der Zufallskoordinaten wird gezählt, ob sich der Punkt innerhalb oder außerhalb der Figur befindet.

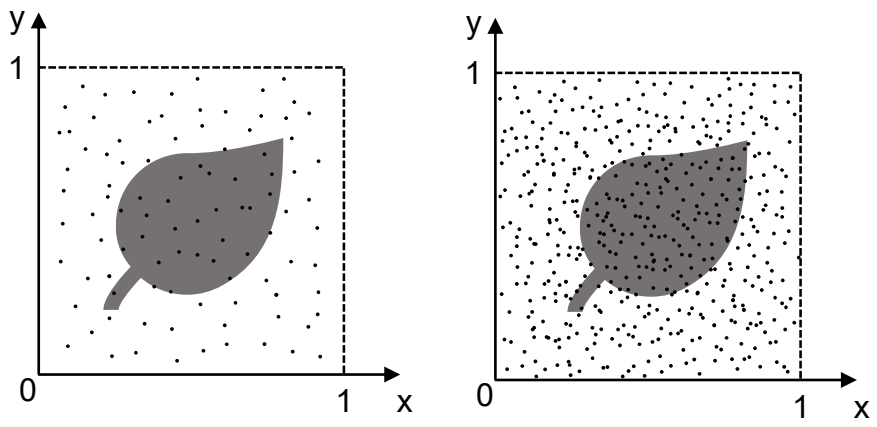


Abbildung 2-9: Flächenermittlung mit MCS mit 100 Koordinatenpunkten (links) und 500 Koordinatenpunkten (rechts)

Die Abbildung 2-9 zeigt zwei Fälle oder MCS mit unterschiedlicher Anzahl an Zufallskoordinaten. Die Fläche der Figur ergibt sich aus der Anzahl der innenliegenden Punkte im Verhältnis zu den außenliegenden [169]. Das Ergebnis wird genauer, je mehr zufällige Koordinaten erzeugt werden und je gleichmäßiger sie verteilt sind. So lässt sich beispielsweise auch die Zahl π durch die Flächenermittlung eines Kreises simulativ ermitteln. Im Kontext der Unsicherheitsberechnung kann die MCS hilfreich sein, um Ergebnisse mit geringem Rechenaufwand anzunähern und ist dabei in der Lage, partiell korrelierte Messunsicherheiten zu berücksichtigen [170].

Unsicherheit primärer Daten

Primärdaten sind Daten, die durch Sensorik direkt am untersuchten Gegenstand gemessen werden. Sie sind mit klassischen Unsicherheitsquellen wie Messunsicherheit behaftet, die auch in vielen anderen technischen Anwendungen anzutreffen sind. Ein Beispiel für einen primären Datensatz ist die Datenerfassung von verbrauchten Ressourcen in einer CNC (Computerized Numerical Control) Werkzeugmaschine. Um die Menge der verbrauchten Ressourcen zu ermitteln, werden mit geeigneter Sensorik Datensätze aufgenommen und verarbeitet. Die Werte des endgültigen Datensatzes sind mit mehreren Unsicherheiten behaftet, wie Messunsicherheit, Unsicherheit aus der Datenverarbeitung, Interpolationsunsicherheit, Skalierungsunsicherheit und Datenmanagementunsicherheit [171]. Die absolute Unsicherheit kann theoretisch berechnet werden, wenn Wissen über jede Quelle verfügbar ist und auch quantifiziert werden kann. Die relative Verteilung kann jedoch oft sehr unterschiedlich und unvorhersehbar sein und ist schwer zu berechnen. Die MCS kann als Ansatz zur Untersuchung verschiedener Quellen der Unsicherheit in einem Modell verwendet werden und kann bei der Untersuchung von Primärdaten im Kontext einer Ökobilanz nützlich sein [171].

Unsicherheit sekundärer Daten

Sekundäre Daten werden verwendet, wenn primäre Daten nicht verfügbar sind. Im Kontext der Ökobilanz werden darüber hinaus sekundäre Daten als Umrechnungsfaktoren genutzt, um die Auswirkung auf die Umwelt von diversen Verbräuchen zu simulieren. Ein in der Praxis häufig verwendetes Beispiel für sekundäre Datensätze ist die Berechnung von Verkehrsemissionen. Transportfahrzeuge wie Lastwagen haben in der Regel keine eingebauten Sensoren zur Messung der von ihnen verursachten Emissionen. Daher wird ein Datenbankwert aus einer Ökodatenbank verwendet, welcher den durchschnittlichen Verbrauch auf der Grundlage von zurückgelegter Entfernung und Ladungsmasse angibt. Die Werte aus der Ökodatenbank beruhen auf Primärdaten von Beispielprozessen, die als Näherungswerte für andere Prozesse dienen. Für die Berechnung wird beispielsweise die Entfernung und die Ladungsmasse verwendet, die in der Regel nicht dem realen Wert, sondern dem Näherungswert entspricht. Der tatsächliche Wert kann nur durch Implementierung von Sensorik am dem Transportfahrzeug ermittelt werden. Außerdem gibt es keinen Datenbankwert für jeden Prozess, sodass in der Praxis oft Werte aus ähnlichen Prozessen verwendet werden. Ein weiteres Beispiel ist die Drucklufterzeugung, die nur als Prozess pro Liter in Ökodatenbanken zu finden ist. Da die Drucklufterzeugung im realen Prozess nicht proportional zur verbrauchten Energie über die Zeit ist, erzeugt ein proportionaler Faktor aus einer Ökodatendank eine Verzerrung, die in dieser Dissertation als sekundäre Datenunsicherheit verstanden wird. Sekundäre Daten können somit versteckte Verzerrungen und einen Mangel an Transparenz aufweisen [172]. Die Nutzung aggregierter Branchendaten zur Verwendung in einer Ökobilanz ist dennoch nützlich, falls es keine Möglichkeit gibt, Primärdaten zu erheben.

Unsicherheit von Modellen zur Ökobilanzierung

Mathematische Modelle werden zur Beschreibung und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Produkten und Prozessen verwendet und sind mit Unsicherheiten behaftet, da sie ein reales physikalisches Verhalten nur annähernd wiedergeben können [153]. In der Ökobilanz sind spezifische Quellen der Unsicherheit vorhanden, die an dieser Stelle erläutert werden. Da die Ökobilanz oftmals auch als Instrument zum Vergleich verschiedener Produkte verwendet wird, ist eine Analyse der Unsicherheit unabdingbar [173]. Unsicherheit in der Ökobilanz wurde in den letzten Jahrzehnten auf unterschiedliche Weise untersucht. HEIJUNGS UND HUIJBREGTS erstellten eine Klassifizierung nach der Zusammenfassung verschiedener Studien über Unsicherheitskategorien in Ökobilanzen durch die Einteilung in drei Typen [174]:

1) Daten, für die kein Wert verfügbar ist,
2) Daten, für die ein ungeeigneter Wert verfügbar ist, und

3) Daten, für die mehr als ein Wert verfügbar ist.

Die Hauptkategorien für Unsicherheit von MORGAN ET AL. werden in späteren Veröffentlichungen zur Ökobilanz von HOFSTETTER [175] sowie von LLOYD UND RIES [176] abgeleitet, in denen die Unsicherheit des mathematischen Ökobilanz-Modells aus sieben Kategorien besteht [157]:

1) Zufallsfehler und statistische Schwankungen wie Messfehler bei physikalischen Konstanten oder modellierten Beziehungen,
2) systematische Fehler und subjektive Beurteilungen wie die Extrapolation von Beziehungen von sorgfältig untersuchten Prozessen auf ähnliche Prozesse,
3) sprachliche Ungenauigkeit wie die Erstellung von Modellen auf der Grundlage von qualitativen Beschreibungen von Beziehungen,
4) Variabilität wie inhärente Variabilität in Prozessbeziehungen,
5) inhärente Zufälligkeit und Unvorhersehbarkeit wie inkonsistente Prozesseigenschaften,
6) Expertenunsicherheit und -uneinigkeit wie Uneinigkeit über Prozessmechanismen sowie Systemverhalten und
7) Annäherung wie Vereinfachungen von realen Systemen, beispielsweise durch Systemgrenzen.

Ein Beispiel für einen konkreten, aber weit verbreiteten Fehler, der bei der Verwendung einer Ökobilanz auftreten kann, ist der Trunkierungsfehler wie er von PERKINS UND SUH beschrieben wird [177]: Beim Kürzen oder Runden von Werten gehen Informationen verloren und durch Weiterverarbeiten der Werte mit Trunkierungsfehler verlieren die Endwerte an Präzision.

Bei der Durchführung einer Ökobilanz ist die Methode stark abhängig von den Annahmen des Anwenders, wie dieser ein Szenario beschreibt. Diese Annahmen werden dann meist komplex weiterverrechnet, was in einer Quelle der Unsicherheit resultieren kann. Dies bietet keine vertrauenswürdige Grundlage für den Vergleich der Ergebnisse. FINNVEDEN ET AL. fassen zusammen, dass Unsicherheiten oft in Ökobilanzstudien nicht berücksichtigt werden, obwohl sie hoch sein können [172]. Um die Unsicherheiten bei der Ökobilanz zu reduzieren, beschreiben HEIJUNGS UND HUIJBREGTS drei Wege [174]. Der erste Weg ist der wissenschaftliche Weg: Es muss mehr geforscht, präzisere Daten gefunden und die Modelle müssen optimiert werden. Der soziale Weg besteht darin, die Interessengruppen umfassend einzubeziehen und die unsicheren Fragen zu diskutieren, um einen Konsens über Daten und Entscheidungen zu finden. Der statistische Weg beschreibt die Einbeziehung von Unsicherheiten wie die Verwendung von

MCS oder die Berechnung mit verschiedener Datenbasis. IGOS ET AL. schlagen Strategien für die verschiedenen Schritte der Unsicherheitsbehandlung vor, die einem grundlegenden, mittleren und fortgeschrittenen Ansatz in der Ökobilanz folgen, wie beispielsweise die Definition des Bereichs von Ergebnissen auf der Grundlage von optimistischen und pessimistischen Szenarien [178]. Darüber hinaus stellt KUCZENSKI fest, dass synthetische Variabilitätsmodelle wie MCS, die für die Untersuchung der Unsicherheit oft sehr beliebt sind, in der Praxis zu falschem Vertrauen führen können und dass eine authentischere Schätzung der Unsicherheit geprüft werden sollte [179]. Die Unsicherheit der sekundären Daten erzeugt meist einen großen Spielraum in der Berechnung der Ökobilanz. Die sich hieraus ergebene Varianz der Ergebnisse zeigen WEYAND ET AL. am Beispiel des CO_2-Fußabdrucks eines Laufrads für Pumpen [180]: Der minimale Wert beträgt 85 kg CO_2eq, wohingegen der maximale Wert 430 kg CO_2eq beträgt. Die Unsicherheiten in der Berechnung sind hier beispielsweise zurückzuführen auf die Datenquelle verschiedene Datenbanken, Emissionsdaten des Stromverbrauchs oder Allokationen der Produktion.

2.3.3 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)

Im Kontext des Qualitätsmanagements ist die Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse (engl. *Failure Mode and Effects Analysis – FMEA*) eine Methode, die bei der Gestaltung von Produkten und Prozessen herangezogen wird. In der Produktentstehung kann zwischen einer Design-FMEA und einer Prozess-FMEA unterschieden werden [181]. Im Zusammenspiel zwischen Komponenten kann außerdem eine System-FMEA durchgeführt werden [182]. Der Hintergrund der Methode ist eine Nichteinhaltung von Anforderungen und Minimierung der Qualität, wenn Fehler im Entwurf über Herstellungsprozesse, Nutzung und Produktlebensende entstehen. Die ursprünglich vom US-Militär unter dem Namen *Failure Mode Effects and critically Analysis Method* entwickelte und 1949 standardisierte Methode ist im deutschen Sprachraum seit 2006 unter der ISO 60812 zu finden [183]. Die Methode sieht einen Umgang möglicher Fehler mit dem Ziel der Verringerung von Fehlerrisiken über den gesamten Produktlebenszyklus vor [184]. Der Name der Methode zeigt die Vorgehensweise: Potentielle Fehler werden weit vor dem Auftreten untersucht und mit einer Wahrscheinlichkeit des Auftretens beschrieben, gefolgt von einer Analyse über die Folgen und das Ausmaß des verursachten Schadens [184]. Abbildung 2-10 zeigt eine Einbettung des Fehlers zu Fehlerursachen und Fehlerfolgen:

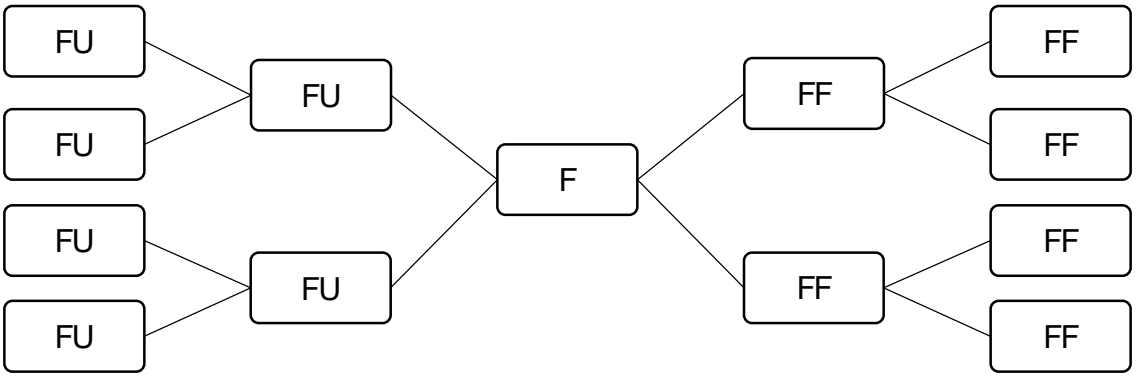


Abbildung 2-10: Wirkungskette von Fehlerursachen (FU), Fehler (F) und Fehlerfolgen (FF) [184]

Der Ablauf einer FMEA orientiert sich an der Wirkungskette. Zunächst werden potentielle Fehler gesucht und beschrieben. Als zweiter Schritt werden die Fehlerursachen identifiziert und bewertet. Im dritten Schritt werden die Fehlerfolgen analysiert und ebenfalls bewertet. Im letzten Abschnitt der Durchführung einer FMEA werden die Möglichkeiten einer frühen Erkennung des Fehlers ermittelt und geeignete Maßnahmen zur Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeit aufgezeigt. Wie in Abbildung 2-10 zu sehen ist, kann sich ein Fehler aus Ketten von Ursachen und Wirkung zusammensetzen. Ein wichtiger Schritt in der FMEA ist das Auffinden der Wirkungsketten [184]. Die Vorgehensweise der Methode kann nach der Abbildung 2-11 beschrieben werden:

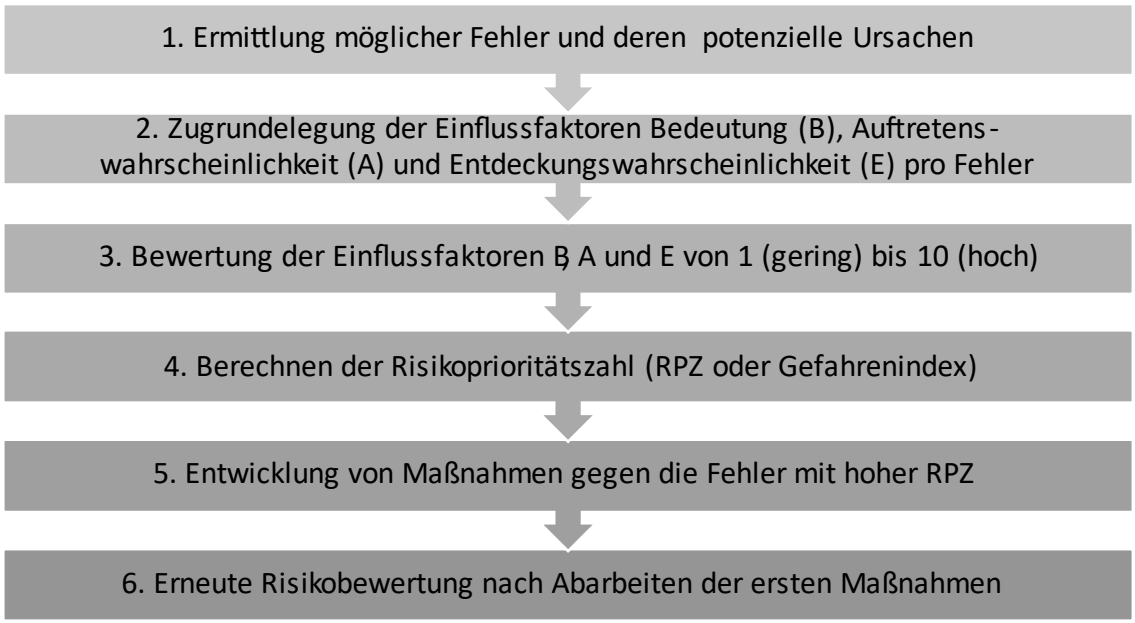


Abbildung 2-11: Allgemeiner Ablauf einer FMEA

Nach der Ermittlung möglicher Fehler und deren potentieller Ursachen ist es ein wesentlicher Bestandteil der Methode, die Risikoprioritätszahl (RPZ) zu berechnen. Um diese zu ermitteln, müssen die Einflussfaktoren Bedeutung (B), Auftretenswahrscheinlichkeit

(A) und die Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) pro Fehler zugrunde liegen. Die Berechnung der RPZ erfolgt mit der Formel:

$$RPZ = B \cdot A \cdot E \qquad 2\text{-}3$$

Die RPZ gibt an, wie hoch das Risiko eines definierten Fehlers ist. Je niedriger der Wert, desto geringer ist das Risiko. Das Intervall der erreichbaren Werte der RPZ ist abhängig von den Bewertungsintervallen der einzelnen Faktoren. Sie ist stets positiv und kann beispielsweise Werte zwischen 1 und 1000 annehmen [184]. In der Regel werden Wertebereiche für RPZ-Werte mit ähnlich hohem Risiko definiert, um die Anwendung praxistauglich zu gestalten. Mögliche Grenzen sind Werte unter 40 (unkritisch) und Werte über 125, bei denen es sich um gravierende Risiken handelt, die eine dringliche Aktion aufzeigen [184]. Bei der FMEA handelt es sich um eine proaktive Vorgehensmethode, die vorbeugend durchgeführt werden soll.

Die FMEA ist in einigen Branchen eine etablierte Methode in unterschiedlichen Anwendungsgebieten. In den letzten Jahren wurde die Methode auch zur Untersuchung von Prozessen in Bezug auf Nachhaltigkeit adaptiert [185]. Ein Beispiel im Kontext der Nachhaltigkeit ist die E-FMEA [186]. Im Gegensatz zur traditionellen FMEA mit dem Schwerpunkt auf möglichen Ausfallrisiken hat die E-FMEA Methode die Untersuchung von Umweltauswirkungen zum Ziel. Dadurch sollen Verbesserungen in der Produktentwicklung erreicht werden. Die Identifizierung, Untersuchung und Bewertung potenzieller Umweltauswirkungen in den Lebenszyklusphasen in einer systematischen Art und Weise ist das Ziel der E-FMEA. Hierfür wird die Ökobilanz in einer reduzierten Variante in den frühen Phasen des Produktlebenszyklus durchgeführt und nur die wichtigsten Umweltkenngrößen den Umweltanforderungen gegenübergestellt.

Eine weitere Implementierung ist die Umwelt-FMEA nach [187]. Aufbauend auf einer traditionellen FMEA werden mögliche Umweltschwachstellen den Komponenten eines Geräts zugeordnet. Eine Checkliste mit Umweltzielen dient zur Suche von Schwachstellen als Kern der Methode. Des Weiteren werden erfolgreiche Umsetzungen der Umweltziele als Beispiele genannt, um das Produkt umweltgerechter zu gestalten. Ein Beispiel eines Umweltziels ist die Verringerung des Energieverbrauchs, die durch minimale Reibungsverluste, einen optimierten Motor oder einen optimierten Arbeitspunkt erreicht werden kann.

2.3.4 Datenprovenienz

Ein essentieller Bestandteil einer Qualitätsbewertung ist das Wissen über den Ursprung von Daten. Das Forschungsfeld der Datenprovenienz befasst sich daher mit der Thematik der Herkunft von Daten. Vor dem Hintergrund der steigenden Menge an Speicherplatz und steigender Geschwindigkeit des Informationsflusses sind der Entstehungsprozess und die Quelle von Daten immer relevanter [188]. Kollaborationen bei einer Lösungsfindung führen dazu, dass Daten getauscht werden und Personen an Daten arbeiten, die sie selbst nicht erzeugt haben [189]. Das Interesse am Wissen des Datenursprungs liegt in der Möglichkeit zur Bewertung der Datenqualität, der Überprüfung von Ableitungs- und Transformationsprozessen sowie der Wiederholung von Daten begründet [188].

Im ursprünglichen Sinn wurde der Begriff der Provenienz (lat. *provenire*, dt. *hervorkommen*, *entstehen*) im Kontext von Kunstgegenständen verwendet [190]. Das Ziel war es, die Chronologie des Besitzes, der Aufbewahrung oder des Standorts des historischen Objekts zu ermitteln. So konnte festgestellt werden, ob es sich um ein Original oder eine Fälschung handelt. Die Rekonstruktion der Historie eines Objekts beruht insbesondere auf der Abfolge von formalen Eigentumsverhältnissen, der Verwahrung und der Aufbewahrungsorte [191]. Ein Kernelement und Grundvoraussetzung für die Ermittlung der Provenienz ist die Art und Weise der vorhandenen und zugänglichen Dokumentation über das Objekt. Das Prinzip der Provenienz lässt sich von physischen Objekten auf digitale Daten übertragen. Allerdings verhalten sich Daten anders als physische Objekte, da Daten oft weiterverarbeitet oder als Kopien genutzt werden [192]. Die Datenprovenienz (engl. *data provenance*, dt. *Datenherkunft* – auch *data lineage* oder *data pedigree*) beschreibt die Quelle oder den Ursprung von Daten als historische Aufzeichnung der Ableitung der Daten, die zum Verständnis des vorliegenden Datensatzes beiträgt [193]. Mithilfe der Datenprovenienz werden Daten um detaillierte Informationen über die aktuelle Darstellung, die Quelle und Erzeugungsprozesse erweitert [194]. Durch diese Informationen ist es möglich, den Datenursprung und die Änderungen, Umwandlungen und Ableitungen einschließlich der beteiligten Akteure zu identifizieren.

Modellbildung von Provenienz

Die beiden meist verwendeten Ansätze zur Modellbildung und Darstellung der Provenienzinformationen sind das Open Provenance Model (OPM) [195] und das PROV-Datenmodell [196]. Das OPM unterscheidet zwischen den drei Entitäten Artefakte, Prozesse und Agenten [197]: Artefakte sind definiert als unveränderlicher Zustand einer physischen Ausprägung eines physischen Objekts oder einer digitalen Repräsentation in

einem Computersystem. Sie können mit Prozessen interagieren und diese auslösen. Prozesse sind demnach Aktionen oder eine Reihe von Aktionen, die durch Artefakte verursacht werden und zu neuen Artefakten führen. Die dritte Entität Agent ist definiert als kontextbezogene Einheit, die als Auslöser eines Prozesses agiert und dessen Ausführung ermöglicht, erleichtert, kontrolliert oder beeinflusst. Im OPM erfolgt die Darstellung der Entitäten über Knotenpunkte mit unterschiedlich definierten Geometrieformen. Artefakte werden durch Quadrate, Prozesse durch Kreise und Agenten durch Achtecke dargestellt. Durch gerichtete Verbindungen werden Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen den Entitäten beschrieben. Ein Beispiel ist die Verbindung zwischen einem Artefakt und einem Prozess. Das Artefakt wurde durch einen Prozess erzeugt und bekommt somit einen gerichteten Pfeil zwischen Artefakt und Prozess. Weitere mögliche Verbindungen sind Nutzung, Trigger, Ableitung und Kontrolle [197]. Ein Charakteristikum des OPM ist außerdem, dass es Artefakte der Vergangenheit abbildet und beschreibt, wie diese entstanden sind. Der Graph wird mit Informationen zum Zeitpunkt ergänzt, um die Funktionalität der Zeithistorie zu integrieren.

Eine weitere Möglichkeit Datenprovenienz abzubilden, bietet das PROV-Datenmodell. PROV besteht aus einer Reihe an Spezifikationsdokumenten, die Daten zur Provenienz modellieren, serialisieren, austauschen, abrufen, zusammenführen, übersetzen und begründen soll. Die vier Grundlagendokumente umfassen ein Ontologiemodell (PROV-O) [198], ein konzeptuelles Datenmodell (PROV-DM) [199], eine menschenlesbare Notation (PROV-N) [200] und ein Set an Bedingungen im Datenmodell (PROV-CONSTRAINTS) [201]. Neben den vier empfohlenen Dokumenten gibt es eine Reihe an zusätzlichen Dokumenten, die spezifische Notationen einschießen wie beispielsweise ein eXtensible Markup Language (XML) Schema (PROV-XML) [202].

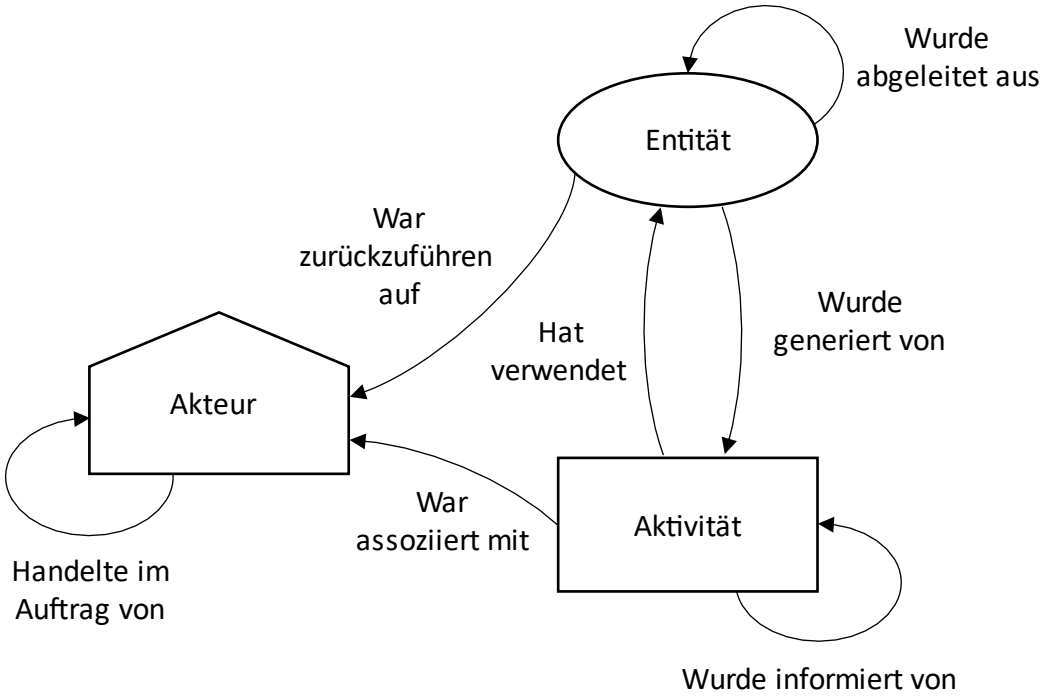


Abbildung 2-12: Knoten und Beziehungen des PROV-Datenmodells nach [203]

Abbildung 2-12 zeigt das Grundkonzept des PROV-Datenmodells. Ähnlich zu OPM werden drei Klassen definiert, die allerdings um weitere Elemente ergänzt werden. Die drei Klassen besitzen definierte Geometrieformen, um eine optische Abgrenzung zu erzeugen. Die erste Klasse ist die Entität (engl. *entity*), die als Ellipse dargestellt wird. Sie ist ein digitales Artefakt oder beliebiges Ding, dessen Herkunft beschrieben werden soll. Die Transformation und der Fluss dieser Entität werden als Ableitungen (engl. *derivation*) bezeichnet. Da es oftmals nützlich ist, mehr Informationen zu der Ableitung zu erhalten, werden die zugehörigen Prozesse mit Zeitbeschreibung abgebildet. Aktivitäten (engl. *activities*) nehmen Entitäten als Eingang, wie an der Beschriftung „Hat verwendet“ zu erkennen ist, und generieren neue Entitäten als Ausgang. Sie besitzen eine rechteckige Form. Aktivitäten können außerdem Informationen an andere Aktivitäten weitergeben. Die Zuweisung von Verantwortlichkeiten ist ein zentrales Element in der Datenprovenienz, die durch Akteure gekennzeichnet wird. Die Akteure (engl. *agent*) sind verantwortlich für die Existenz der Entitäten (Zurückführung, engl. *attribution*), vergangene Aktivitäten (Assoziation, engl. *association*) und andere Agenten (Delegation, engl. *delegation*). Sie werden als Fünfeck mit zwei rechten Winkeln dargestellt. Die Beschreibung der Beziehungen ist bewusst in der Vergangenheit gehalten, um den Leser daran zu erinnern, dass die Provenienz eine Beschreibung von Vorgängen aus der Vergangenheit ist [204].

Provenienz und Nachhaltigkeit

Im Kontext der Nachhaltigkeit können Provenienzmodelle dazu beitragen, die Herkunft der Daten schematisch zu erfassen und zu analysieren. Bei einer wirksamen und transparenten Nachhaltigkeitsbewertung durch beispielsweise ein Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) werden Daten aus einer Vielzahl heterogener Quellen aus verschiedenen Ländern, Wissenschafts- und Wirtschaftsbereichen sowie Institutionen benötigt, die mit einem Provenienzmodell abgebildet werden können [205]. Es wurden bereits Datenmodelle entwickelt, die die Provenienz einer Ökobilanz ermöglichen, mit dem Ziel, die Daten transparent zu machen und eine Durchführung der Ökobilanz zu reproduzieren [206]. Auch die Datenintegration und der Datenaustausch sollen unterstützt werden. Allgemein existieren zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Dissertation nur wenige Anwendungen im Kontext Provenienz und Nachhaltigkeit.

2.4 STEP – ISO 10303

Die STEP-Normreihe stellt eine wesentliche Grundlage der Produktdatentechnologie dar und liefert mit dem integrierten Produktmodell die Basis, um einheitliche Funktionen zur Verarbeitung von Produktdaten zu entwickeln [207]. Dabei steht STEP für *Standard for the Exchange of Product Model Data* und ist unter der Normreihe für *Industrielle Automatisierungssysteme und Integration – Darstellung und Austausch von Produktdaten* (ISO 10303) zu finden, die neben dem Produktdatenaustausch auch die Produktdatenspeicherung und -archivierung sowie die Produktdatentransformation beinhaltet [208]. Durch STEP wird eine Produktrepräsentation inklusive Vorgehensweise und Definition zum Austausch der Daten bereitgestellt, die im gesamten Produktlebenszyklus genutzt werden kann. Die Möglichkeit der Nutzung von STEP über verschiedene Prozessketten und Computersysteme ebenso wie über die Lebensphasen macht es zu einem geeigneten Werkzeug für den Digitalen Zwilling [21]. In dieser Dissertation wird das STEP Produktdatenmodell im Digitalen Zwilling angewendet, indem Informationen daraus bezogen und ergänzt werden.

2.4.1 Grundlagen und Struktur

In STEP wird eine formelle Spezifikationssprache EXPRESS genutzt, die in der ISO 10303-11 definiert ist. Damit wird eine Präzision und Konsistenz bei der Darstellung ebenso wie eine Erleichterung bei der Implementierung ermöglicht [209]. Sogenannte Anwendungsprotokolle (AP) dienen zur Spezifikation der Darstellung von Produktinformationen für

gezielte Anwendungen. Eine Übersicht des Aufbaus in der STEP Normreihe ist in Abbildung 2-13 zu sehen. Der Aufbau gliedert sich in Abschnitte, die Serien genannt werden [210].

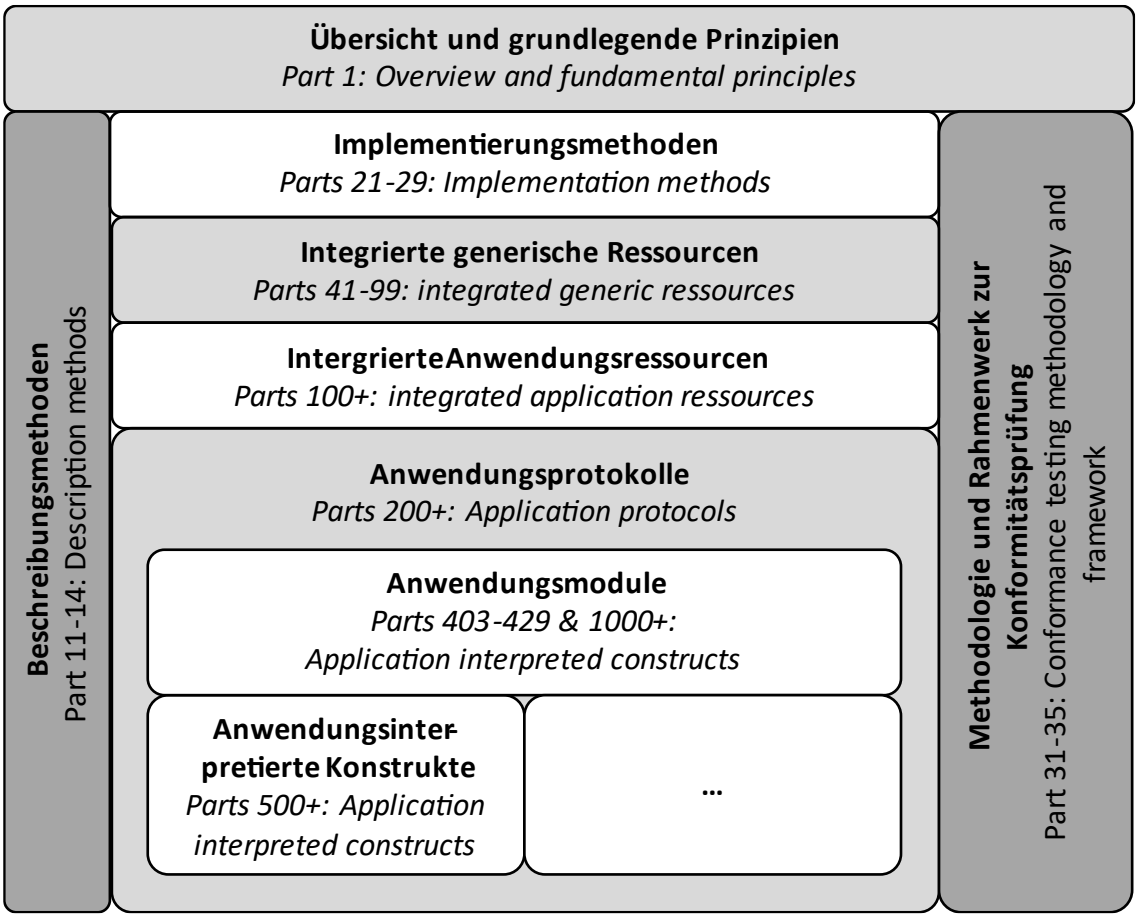


Abbildung 2-13: Struktur der ISO 10303 nach [211] mit Ergänzungen von [212, 213]

Das erste Dokument der Normreihe (Teil 1) bietet eine Übersicht und stellt grundlegende Prinzipien als Einführungsdokument von STEP dar. In den Beschreibungsmethoden (Teil 11-14) werden Spezifikationsmethoden aufgeführt, die eine formale Abbildung von Produktdaten und Modellbeschreibungen ermöglichen. Hierzu zählen beispielsweise die Beschreibungssprache EXPRESS und EXPRESS-G.

Durch Implementierungsmethoden (Teil 21-29) ist die Integration in unterschiedliche Softwarelösungen definiert. Die Trennung zwischen der Spezifikation von Datenmodellen und der Implementierung des Datentausches ist hierbei ein Alleinstellungsmerkmal von STEP [213]. Ein Beispiel für die Implementierung ist die Spezifikation als Textdatei wie sie im Kapitel 2.4.3 beschrieben wird [214] oder die Ausführung in der Auszeichnungssprache XML [215]. Weiterhin wird in der ISO 10303-22 eine standardisierte und programmiersprachenneutrale Schnittstelle (engl. *Standard Data Access Interface –*

SDAI) definiert, die eine Manipulation der EXPRESS-spezifizierten Daten von anderen Softwareanwendungen zulässt [216].

In den Dokumenten 21-35 werden Methodologie und Rahmenwerk zur Konformitätsprüfung von Implementierungen beschrieben. Diese beinhalten neben allgemeinen Konformitätskriterien und allgemeiner Darstellung von Testdaten auch Testverfahren und Vorgehensweise der Testdurchführung.

Integrierte Ressourcen dienen als Grundlage des integrierten Produktmodells und sind aufgeteilt in generische Ressourcen und Anwendungsressourcen [207]. Die integrierten generischen Ressourcen (Teil 41-99) sind verantwortlich für Produktmerkmale, die unabhängig von einem Anwendungskontext bestehen wie beispielsweise Materialien (Teil 45) oder die visuelle Repräsentation (Teil 46) [217, 218]. In den integrierten Anwendungsressourcen (Teil 100+) werden Produktmerkmale für einen spezifischen Anwendungssachverhalt definiert. Hierunter fallen Zeichnungen oder auch Finite-Elemente-Analysen [219, 220].

Konkrete Anwendungsbereiche und -kontexte werden in den Anwendungsprotokollen (AP)(Teil 200+) beschrieben. Die Definitionen enthalten Anweisungen über anwendungsabhängige Spezifikationen, die die Grundlage für Implementationen liefern. Durch Mechanismen wie Vererbung und Spezialisierung werden kontextbezogene Ausprägungen von Basismodellen als Produktdatenmodelle abgeleitet [207]. Innerhalb der AP werden weiterführend Anwendungsmodule (Teil 403-429 und 1000+) standardisiert. Dort werden anwendungsbezogene Sätze von Informationsanforderungen in einem *Application Reference Model* gebündelt und in ein modulspezifisches Datenmodell (*Module Interpreted Model*) überführt. Neben den Anwendungsmodulen sind innerhalb der AP anwendungsinterpretierbare Konstrukte (Teil 500+) definiert. Ziel dieser Konstrukte ist eine Modularisierung der Normreihe. Somit soll eine Informationsintegration zwischen den verschiedenen AP ermöglicht werden.

2.4.2 STEP-Anwendungsprotokoll 242

In dieser Dissertation wird das AP 242 (ISO 10303-242: Industrielle Automatisierungssysteme und Integration – Produktdatendarstellung und -austausch – Teil 242: Anwendungsprotokoll: Modellbasiertes 3D-Engineering) verwendet [221]. Die Idee hinter dem AP 242 ist ein Modell zum Informationsaustausch dreidimensionaler Konstruktionen von mechanischen Einzelteilen und Baugruppen. Entwicklungs- und Produktdaten der Bauteile sind im Modell enthalten und ermöglichen eine Informationsgrundlage bereits in der Konstruktions- und Fertigungsplanungsphase des Produkts. Der Ursprung der Ent-

wicklung des AP 242 liegt in der Zusammenführung von AP 203 (Informationsanforderung zur Verwaltung von Bauteilen und Baugruppen auf 3D-Basis) sowie AP 214 (insbesondere Informationsanforderungen der Automobilindustrie) und soll deren Anwendungsbereiche mit abdecken. Das AP 203 fand vorrangig in der Luft- und Raumfahrtindustrie sowie in der Verteidigungsindustrie Anwendung, wobei es Strukturen zum Austausch von Draht-, Flächen- und Begrenzungsflächenmodellen (engl. *Boundary Representation Model*) zusammen mit den Verwaltungsdaten für die Konstruktionsphase liefert [34]. Das AP 214 hingegen ist eine Ausrichtung auf den Automobilsektor mit Erweiterung um Informationen zu Toleranzen und Angaben der Oberflächenbehandlung am Geometriemodell des Bauteils. Die Geometrie- und Topologiedaten der beiden AP sind ähnlich, daher wurde beschlossen, die AP zusammenzuführen.

Das AP 242 ermöglicht eine Repräsentation des visuellen Erscheinungsbildes und eine Repräsentation von nicht-geometrie Informationen im Produktmodell. Zudem enthält das AP 242 einen erweiternden Funktionsumfang im Bereich von Produktfertigungsinformationen (engl. *Product and Manufacturing Information – PMI*) [222].

2.4.3 Aufbau einer STEP-Datei

Im Teil 21 der ISO 13030 wird die Implementierungsmethode für eine Klartextkodierung der Austauschstruktur definiert [214]. Die Dateien sind menschenlesbar (ASCII-Kodierung) und werden aufgrund der Norm ISO 13030:21 auch als p21-Dateien oder STEP physical file bezeichnet, trotz der typischen Endung auf .stp oder .step [213]. Die p21-Dateien haben einen sequentiellen Aufbau, die mit „ISO-10303-21;“ beginnen und mit „END ISO-10303-21;“ enden. Es kann zwischen zwei Abschnitten unterschieden werden: dem Kopfabschnitt (engl. *header*) und dem Datenabschnitt (engl. *data*). Im Kopfabschnitt sind administrative Informationen und Angaben zur Datei enthalten, wie beispielsweise der Autor oder ein Zeitstempel. Der Kopfabschnitt wird durch „HEADER;“ eingeleitet und endet auf „ENDSEC;“. Der mit „DATA;“ beginnende Datenabschnitt beinhaltet Instanzen von EXPRESS-Schemataelementen mit zugehörigen Attributen aus dem Datenmodell. Die Instanzen werden auch als Entitäten bezeichnet und verfügen über eine eindeutige Identifizierung durch einen Hash. Die Entitäten können sich gegenseitig referenzieren, wobei eine zyklische Referenzierung ausgeschlossen ist. In p21-Dateien können beliebige Daten ausgetauscht werden, solange ein einheitliches Datenmodell beim Austausch verwendet wird. Informationen zur Syntax, Symbolik und Semantik sind der ISO 10303:21 zu entnehmen [214].

In der Abbildung 2-14 wird die Erstellung einer p21-Datei zum Datenaustausch am Beispiel zweier Kreise veranschaulicht. Die Grundlage bilden zum einen ein EXPRESS-

Schema, welches das Datenmodell beschreibt, und zum anderen die Objekte der Anwendung. Im vorliegenden Fall sollen zwei zweidimensionale Kreise mit unterschiedlichem Mittelpunkt und unterschiedlichem Radius in einer p21-Datei abgebildet werden. Nach der Definition des EXPRESS-Schemas im Kopfabschnitt, welches durch „FILE SCHEMA“ beschrieben wird, werden die Positionen der beiden Mittelpunkte festgehalten. Das Symbol „$“ zeigt an, dass das Attribut nicht gesetzt wurde. Die Kreise werden anschließend mit der Referenz auf die Mittelpunkte und einem Radius abgebildet. Die abgebildeten Entitäten „POINT“ und „CIRCLE“ bilden zusammen die geometrische Form der Kreise ab. Zur Beschreibung der geometrischen Repräsentation können weitere Entitäten genutzt werden. In STEP werden dazu mehrere Geometrietypen unterschieden, die als Grundbausteine die Typen kartesischer Punkt (engl. *cartesian point*) und Richtung (engl. *direction*) haben [34]. Durch die Grundbausteine können Positionierungen und Orientierung (engl. *placements*) im zwei- oder dreidimensionalen Raum festgelegt werden. Kurven (engl. *curves*) und Flächen (engl. *surfaces*) nutzen diese placement-Entitäten zur Festlegung von Orientierung und Positionierung. Die curve-Entitäten werden zur Definition von weiteren Kurvenformen genommen. So kann eine Verbundkurve (engl. *composite curve*) durch verschiedene curve-Entitäten oder eine Offset-Fläche (engl. *offset surface*) durch eine surface-Entität und eine placement-Entität beschrieben werden. Zur Beschreibung von Körpern wird im AP 242 die Entität *solid model* verwendet, die durch die Entität *manifold solid brep* spezifiziert ist. Dabei handelt es sich um ein endliches, zusammenhängendes Volumen mit einer Begrenzung von einer oder mehreren Flächen. Weitere Elemente und Zusammenhänge sind der ISO 10303:42 (Allgemeine integrierte Ressourcen: Geometrische und topologische Darstellung) zu entnehmen [223].

Neben der geometrischen Repräsentation kann eine STEP-Datei auch durch eine topologische Repräsentation beschrieben werden, welche ebenfalls in der ISO 10303:42 definiert ist. Die topologischen Entitäten haben optionale Verlinkungen zu den geometrischen Entitäten. So kann beispielsweise ein *vertex point* (topologische Entität) mit einem *point* (geometrische Entität) assoziiert sein. Die AP 242 ermöglicht beide Repräsentationen. Des Weiteren ist neben dem Geometriemodell auch ein Produktstrukturmodell in AP 242 vorhanden.

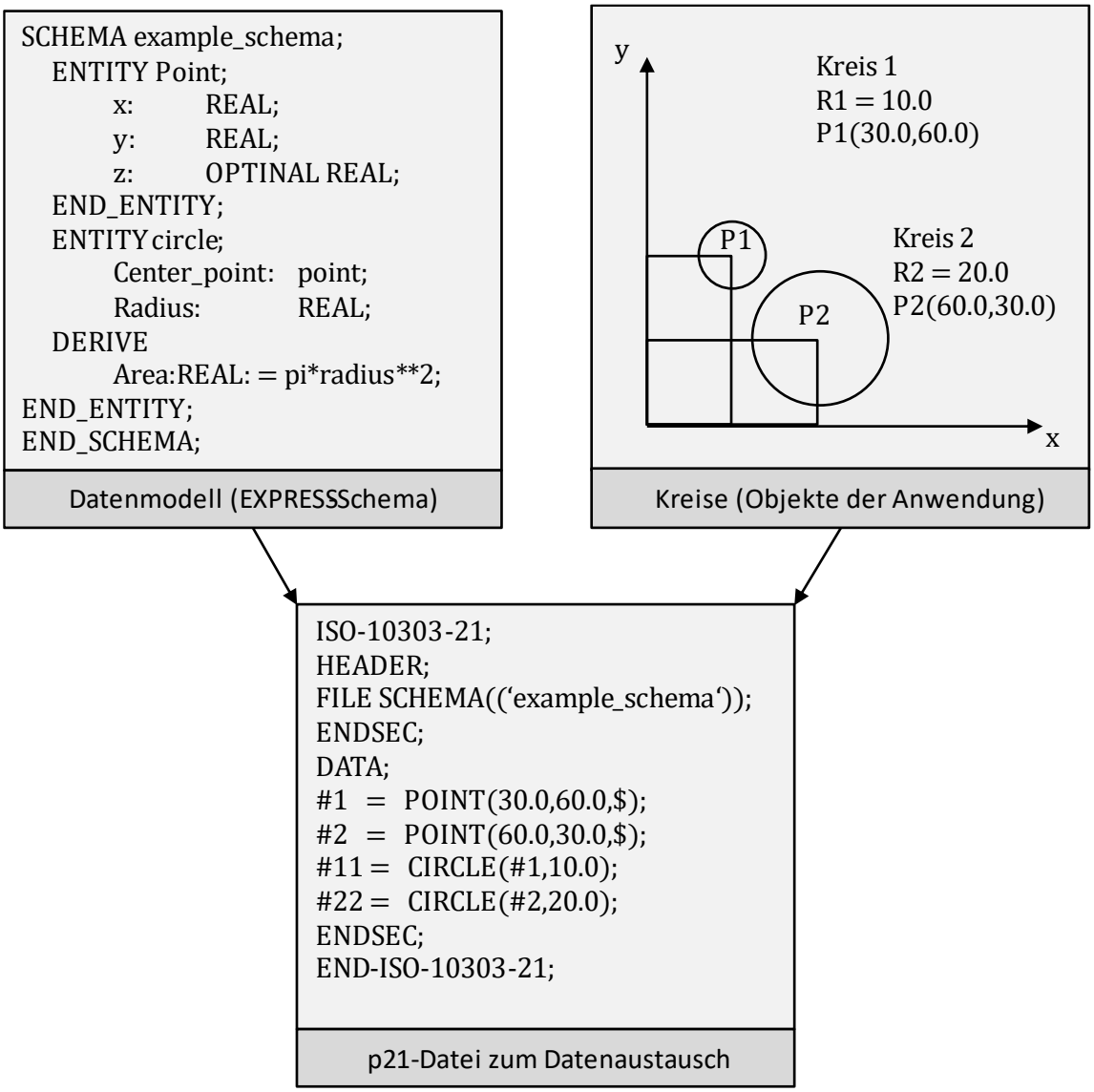


Abbildung 2-14: Beispiel für den Zusammenhang zwischen Datenmodell, realen Objekten und p21-Datei nach [207]

2.5 Fazit und Forschungspotenzial

Im Kapitel 2 werden die Grundlagen und der Stand der Technik zu den vier Themenbereichen Digitalisierung und Nachhaltigkeit, CO_2-Fußabdruck, Qualitätsmanagement und STEP – ISO 10303 vorgestellt. Im ersten Themenbereich Digitalisierung und Nachhaltigkeit werden insbesondere die Industrie 4.0 und der Digitale Master sowie Digitale Zwilling behandelt. Die Vernetzung von Akteuren entlang einer Wertschöpfungskette und der bidirektionale Datenaustausch zwischen den organisatorischen Informationsebenen eines Unternehmens durch die Industrie 4.0 dient als Grundbaustein der modernen Datenkommunikation. Zu diesem Zweck wird der Digitale Zwilling als Schlüsselkonzept der Industrie 4.0 beschrieben und in dieser Dissertation als grundlegendes Konstrukt zur Informationsgewinnung und zum Informationsaustausch genutzt. Die Integration einer

Nachhaltigkeitsperspektive in den Digitalen Zwilling kann als Erweiterung des Konzepts gesehen werden. Es existieren bereits zahlreiche Anwendungen, die durch den Digitalen Zwilling Ressourcen einsparen und somit auch die ökologische Bilanz verbessern. Neu ist der Gedanke der produkt- bzw. bauteilindividuellen Integration der Nachhaltigkeit, die die Lebensphasen Produktion, Nutzung, Recycling sowie Entsorgung umfasst. Die ökologische Nachhaltigkeit geht bei der Einsparung von Ressourcen oftmals einher mit einer ökonomischen Nachhaltigkeit. Neben der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit bildet die dritte Säule die soziale Nachhaltigkeit. Diese ist in der Regel komplex zu quantifizieren und wird daher in vielen Anwendungen vernachlässigt. Dagegen existieren für die Quantifizierung der ökologischen Nachhaltigkeit bereits etablierte Methoden. Eine dieser Methoden ist die Ökobilanz, die in der Normreihe ISO 14040 definiert wird.

Die Ökobilanz wurde als Methode vielfach verwendet, allerdings lassen sich an den Durchführungen in der Praxis Schwachstellen finden. So zeigt beispielsweise eine Studie, dass nur 29 % von 58 Ökobilanzen rekonstruiert werden können, weil die Durchführung Informationslücken aufweist [7]. Als Teilergebnis der Ökobilanz hat sich die ökologische Nachhaltigkeitskennzahl CO_2-Fußabdruck etabliert, wobei sich der Begriff von der ursprünglichen Bedeutung der Kompensationsfläche entfernt hat und zum gegenwärtigen Zeitpunkt in einem anderen Kontext verwendet wird [224]. Ebenso kann die Unsicherheit einer Ökobilanz signifikante Unterschiede in der Bewertung einer Studie erzeugen und muss daher umfassend betrachtet werden [225]. Gründe für die hohe Unsicherheit sind beispielsweise die Verwendung von Sekundärdaten aus Datenbanken, die bereits eine Unsicherheit mitbringen oder nur bedingt den Anwendungsfall abdecken, oder die individuell frei wählbare Systemgrenze um das zu bilanzierende Produkt. Aus diesem Grund ist ein Qualitätsmanagement wichtig, das zum einen die Datenqualität von Primär- als auch Sekundärdaten beschreibt und zum anderen eine Analyse der Unsicherheit des CO_2-Fußabdrucks berücksichtigt. Vereinzelt wird in der Literatur auf Methoden eines Qualitätsmanagements für den CO_2-Fußabdruck eingegangen, wie beispielsweise die Beschreibung der Datenqualität einer Ökobilanz durch das DQR, allerdings existiert kein einheitliches Vorgehen, welches den gesamten Prozess einer CO_2-Fußabdruckermittlung berücksichtigt.

Zusammenfassend ergibt sich eine Forschungslücke in der systematischen Integration des CO_2-Fußabdrucks in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling. Im Digitalen Master sind Produktstruktur- sowie Geometriemodelle enthalten und im Digitalen Zwilling sind die aktuellen Verbrauchsdaten oder auch die historischen Daten des physischen Zwillings vorhanden, die zur Ermittlung des CO_2-Fußabdrucks genutzt werden können. Weiterhin bietet STEP eine Basis für einen einheitlichen Informationsaustausch von Produkt-

und Produktionsdaten und besitzt das Potenzial, zusammen mit dem CO_2-Fußabdruck und den Produktstruktur- und Geometriemodellen eine Nachhaltigkeitsbewertung und -analyse in den Digitalen Master und den Digitalen Zwilling zu integrieren.

3 Handlungsbedarf und Anforderungsprofil

Basierend auf den zuvor vorgestellten Grundlagen und dem Forschungspotenzial erfolgt in diesem Kapitel die Ermittlung des wissenschaftlichen Handlungsbedarfs sowie die Bestimmung einer Zieldefinition für das zu entwickelnde Konzept. Es folgt eine Beschreibung des Nutzungsszenarios, aus dem die Anforderungen an das Konzept abgeleitet werden.

3.1 Handlungsbedarf

Die fortschreitende Digitalisierung von Produktionsprozessen und das immer größer werdende Verlangen nach umweltfreundlichen Produkten und Herstellungsprozessen stellen produzierende Unternehmen vor zahlreiche Herausforderungen. Trotz der Bestrebungen die Umweltauswirkungen von Produkten und Produktionsprozessen durch den PCF zu quantifizieren, bleibt die Kennzahl in der Vergleichbarkeit außerhalb der eigenen Produktkategorie ohne Aussagekraft [104]. Es besteht daher Handlungsbedarf für ein Qualitätsmanagement zur Kennzahl des PCF, das eine Prüfung der Berechnung durchführt und die allgemeine Aussagekraft untersucht. Insbesondere bedarf es eines systematischen Vorgehens zur Berechnung des PCF, welches direkt in den individuellen Entstehungsprozess von Produkten integriert ist. Aktuell findet eine Durchführung der Ökobilanz nach dem Produktentstehungsprozess und auf Basis von Durchschnittsdaten der Produktion oder Sekundärdaten aus Ökodatenbanken statt, obwohl eine genauere Ermittlung durch Primärdaten möglich wäre. Die Gründe hierfür sind die Komplexität der Ökobilanz und die fehlende Umsetzung der Digitalisierung von Produktionsprozessen vieler Unternehmen. Wird bei der Digitalisierung der Gedanke der Ökobilanz mitgedacht, kann eine direkte Verknüpfung der Daten zu den jeweiligen Produkten und Prozessen dazu führen, dass die ökologische Nachhaltigkeit in Form des CO_2-Fußabdrucks in jedem Schritt der Produktentstehung errechenbar ist und somit die Entscheidungsqualität erhöht werden kann.

Aktuelle Entwicklungen zur Integration der Ökobilanz in CAD-Systemen ermöglichen es, dass bei der Konstruktion und Planung von Produktionsprozessen die ökologischen Auswirkungen von Produkten berücksichtig werden [226]. Allerdings beruhen die meisten Integrationen auf einer vereinfachten Ökobilanz, die lediglich einen geringen Hand-

lungsspielraum der Parameter der Ökobilanz ermöglichen. Zur ersten Einschätzung einer Umweltauswirkung liefert die vereinfachte Ökobilanz ein Ergebnis – sie sollte aber nicht als Entscheidungsgrundlage genutzt werden, da die Ergebnisse oftmals von Ergebnissen nach der Produktion abweichen. Ein weiteres Problem in der Verwendung der integrierten Ökobilanz ist die Weiterverwendbarkeit. Die Informationen und Rahmenbedingungen zur Durchführung der Ökobilanz gehen bei der Weitergabe der Daten durch die nativen Datenformate verloren. Weiterhin zeigt sich, dass Informationen im Produktentstehungsprozess existieren, die in der Ökobilanz nicht genutzt werden. So zeigt eine Untersuchung, dass CAM-Daten bei der Durchführung einer Ökobilanz verwendet werden können, um das Ergebnis näher an den tatsächlichen Wert nach einer Produktion zu rücken [227]. Es bedarf daher der Möglichkeit einer Informationsbereitstellung zur unabhängigen Durchführung einer Ökobilanz, die die Daten aus der Konstruktionsphase, der Planungsphase und der Produktion nutzt. Die Ergebnisse sollen nachvollziehbar sein und im Anschluss transparent weitergegeben werden können.

Die Weitergabe von Daten wurde in den letzten Jahrzehnten durch die Entwicklung neutraler Datenformate immer weiter vorangetrieben. Sie ermöglichen einen Datenaustausch in der Produktentstehung von der Konstruktion bis zur Produktion, allerdings stellt die Zuordnung von verwendeten Produktionsressourcen im integrierten Produktdatenmodell eine offene Forschungsfrage dar. Diese Zuordnung ermöglicht eine Informations- und Datengrundlage einer Ökobilanz und somit auch für den PCF.

3.2 Zieldefinition

Der Handlungsbedarf dient als Grundlage zur Definition des Ziels dieser Dissertation. Diese lautet wie folgt:

Das Ziel dieser Dissertation ist die Entwicklung eines Konzepts zur Bereitstellung der Informationen und Methoden zur Berechnung des CO_2-Fußabdrucks von Produkten im Digitalen Master und Digitalen Zwilling. Der CO_2-Fußabdruck von Produkten soll den Phasen der Produktentstehung transparent berechnet werden und eine Beschreibung der Aussagekraft besitzen.

Die Zieldefinition lässt sich in vier Teile gliedern: ein globales Ziel und drei Teilziele. Das globale Ziel ist die Integration von Informationen und Operationen in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling. Dies umfasst Informationen und Methoden der Teilziele und verknüpft diese logisch. Das Resultat ist ein transparent berechneter PCF, der eine Beschreibung zur Aussagekraft enthält und mit einer Repräsentation des Produkts in Form des neutralen Datenformats STEP verlinkt ist.

Das erste Teilziel ist die Berechnung des PCF. Um diese Berechnung durchführen zu können, müssen Informationen zur Herstellung des Produkts vorhanden sein. Diese sind je nach Produktlebensphase unterschiedlich. In der Konstruktionsphase sind nur Sekundärdaten aus Durchschnittdaten zum Herstellungsprozess ableitbar. Je weiter ein Produkt in seiner Lebensphase voranschreitet, desto mehr Primärdaten können zur Berechnung genutzt werden. Die Methodik in dieser Dissertation soll die Berechnung des PCF inklusive der Unsicherheit in den Phasen in der Produktentstehung ermöglichen. Die Phasen umfassen Konzept, Entwurf, detailliertes Design, Arbeitsvorbereitung und Produktion.

Das zweite Teilziel ist eine Beschreibung der Aussagekraft des PCF. Die Beschreibung der Aussagekraft soll dazu beitragen, zusätzliche Informationen zum PCF zu liefern, da die Kennzahl mit Unsicherheiten und individuellen Entscheidungen versehen ist. Die Beschreibung und Quantifizierung der Aussagekraft können dazu verwendet werden, um Maßnahmen zur Steigerung der Aussagekraft abzuleiten. Eine hohe Aussagekraft kann genutzt werden, um die Entscheidungsqualität aufgrund des PCF zu erhöhen, wie beispielsweise die Wahl eines Fertigungsverfahrens.

Das dritte Teilziel ist die Schaffung von Transparenz für den PCF, da getroffene Entscheidungen und genutzte Datenquellen im finalen Wert des PCF nicht repräsentiert sind. Die Transparenz soll eine Nachvollziehbarkeit der Berechnung des PCF erzeugen. Somit können nicht nur potentielle Schwachstellen in der Berechnung offen dargelegt werden, sondern auch eine Basis für Verbesserungen in der Datengrundlage und methodischen Durchführung geboten werden.

3.3 Betrachtetes Nutzungsszenario

Im folgenden Abschnitt wird das Nutzungsszenario beschrieben, welches die Systemgrenze definiert und somit das Konzept dieser Dissertation präzisiert. Aus dem vorgestellten Nutzungsszenario werden Anwendungsfälle des Anwendungssystems abgeleitet, die wiederum die Grundlage zur Ermittlung der Anforderungen bilden. Zur Beschreibung des Nutzungsszenarios wird das Anwendungsfalldiagramm der Unified Modeling Language (UML) in der Version 2.5 genutzt, welches zur allgemeinen Modellierung von Funktionalitäten eines Systems auf hohem Abstraktionsniveau aus der Sicht des Anwenders gedacht ist [228]. Im Anwendungsfalldiagramm wird die Systemgrenze durch ein Rechteck dargestellt, in dessen Inneren sich die Anwendungsfälle des Systems befinden und somit die Bestandteile des Systems definieren. Außerhalb der Systemgrenze befinden sich die Akteure, die mit dem System interagieren. Sie modellieren einen Typ oder eine Rolle, die ein externes System oder ein externer Benutzer einnimmt. Menschliche

Rollen werden durch die Darstellung einer Strichmännchen-Notation angezeigt. Dabei ist zu beachten, dass Akteure keine physikalischen Instanzen von Systemen oder Personen sind, sondern repräsentative Rollen einnehmen. Anwendungsfälle werden durch Ellipsen dargestellt und spezifizieren eine geschlossene Menge von Aktionen, die von einem System zur Verfügung gestellt werden, ohne zu definieren, auf welche Art und Weise dies zu geschehen hat. Die Beziehungen zwischen Anwendungsfällen und Akteuren werden im vorliegenden Nutzungsszenario durch vier Typen beschrieben. Die bidirektionale Kommunikation wird durch eine Assoziation (durchgezogener Strich) symbolisiert, welche einem Akteur den Aufruf eines Anwendungsfalls oder den Erhalt von Informationen ermöglicht. Durch die Include-Beziehung (gestrichelter Strich mit Pfeilspitze) wird eine unbedingte Einbindung der Funktionalität eines Anwendungsfalls in einen weiteren Anwendungsfall modelliert. Dahingegen zeigt eine Extend-Beziehung (ebenfalls gestrichelter Strich mit Pfeilspitze) eine bedingte Einbindung an, in der beide Anwendungsfälle unabhängig bleiben und auch separat ausgeführt werden können.

In der Abbildung 3-1 ist das Anwendungsfalldiagramm des betrachteten Nutzungsszenarios zu sehen. Die einzelnen Akteure und Anwendungsfälle werden im Folgenden erläutert.

Akteure

Der *Konstrukteur* erstellt die rechnerinterne Konstruktion der Bauteile des Produkts. Im vorliegenden Anwendungsfall ist er für die Erstellung des CAD-Modells zuständig und bereitet dieses so vor, dass es im Anwendungssystem genutzt werden kann.

Der *Ingenieur der Arbeitsvorbereitung* besitzt spezifische Kenntnisse über die Produktion der Bauteile und der verwendeten Produktionsmaschinen. Er ist für die Erzeugung des CAM-Programms zuständig und bereitet das CAM-Modell entsprechend auf. Im Nutzungsszenario kann es sich bei dem Konstrukteur und dem Ingenieur der Arbeitsvorbereitung um die gleiche Person handeln.

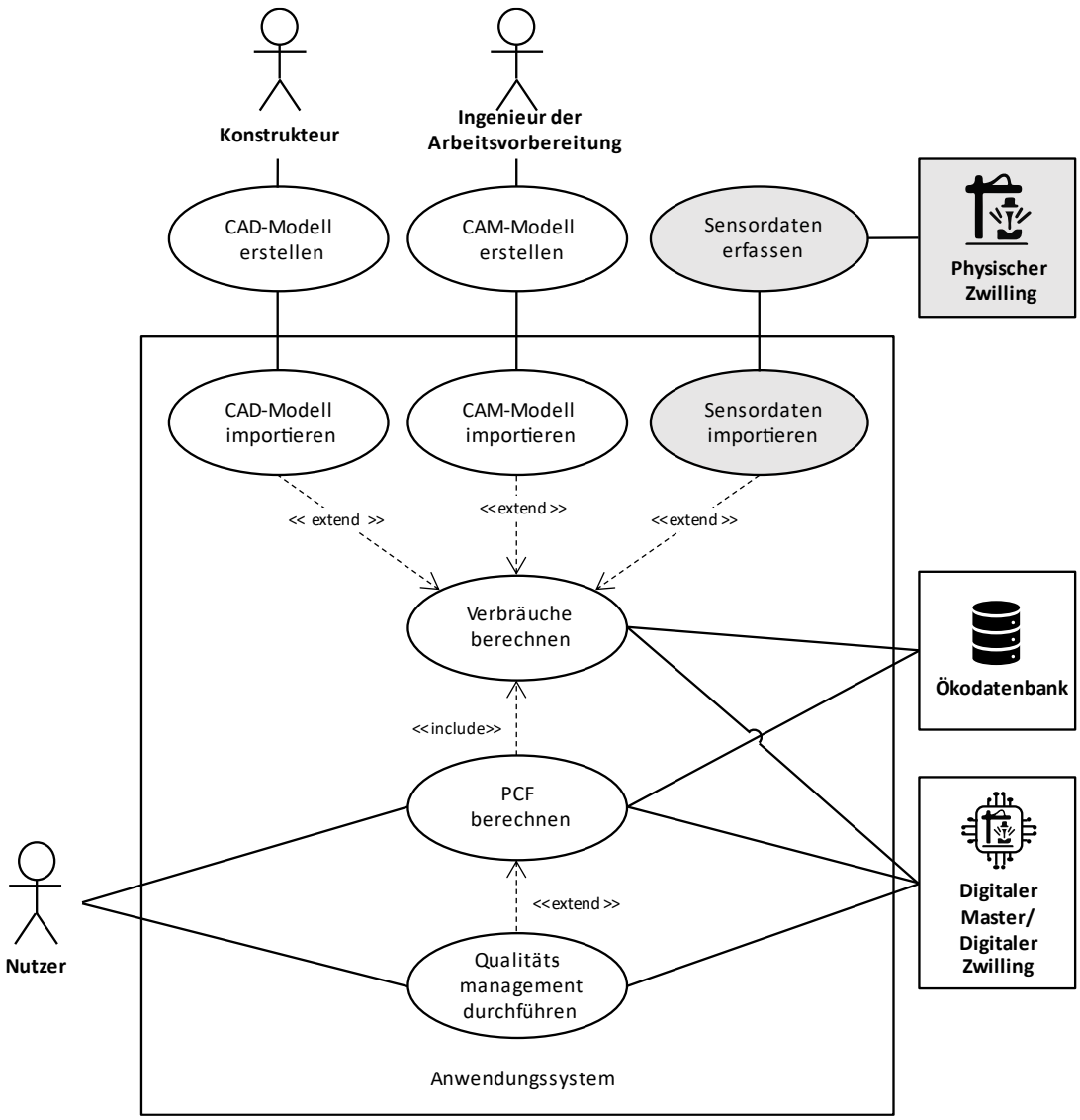


Abbildung 3-1: Anwendungsfalldiagramm des Nutzungsszenarios

Der *Nutzer* wendet das Anwendungssystem an. Es kann sich hierbei um eine natürliche Person handeln, die mit einer graphischen Benutzungsoberfläche interagiert. Weiterhin kann der Nutzer auch ein Softwaresystem sein, welches durch eine Schnittstelle mit dem Anwendungssystem verbunden ist und auf diese Weise die Anwendungsfälle ausführt.

Der *physische Zwilling* ist das real produzierte Produkt oder die Produktionsmaschine. An dieser werden definierte Größen während der Produktion gemessen. Die Messung erfolgt meist durch Sensorik, die direkt mit den Produktionsmaschinen verbunden ist. Der physische Zwilling existiert erst ab der Phase der Produktion und ist daher grau hinterlegt.

Die *Ökodatenbank* ist ein Speicherort für Prozesse, deren Umweltauswirkungen durch Dritte erhoben wurden. Aus der Ökodatenbank lassen sich Sekundärdaten und Umrechnungsfaktoren der genutzten Prozesse ableiten. Externe Ökodatenbanken werden in der

Regel zugekauft und ist nicht veränderbar. Um eigene Daten zu den Umweltauswirkungen von Prozessen zu speichern, wird eine interne Ökodatenbank genutzt.

Ein weiterer Akteur ist der *Digitale Master* bzw. *Digitale Zwilling*. Vor der Phase der Produktion wird der Digitale Master und ab der Phase der Produktion der Digitale Zwilling genutzt. Der Akteur repräsentiert das digitale Abbild des real produzierten oder zu produzierenden Bauteils oder von Produktionsmaschinen, in welchem Verhaltens-, Zustands- und Simulationsmodelle enthalten sein können. Er kann automatisiert Prozesse auslösen und aktuelle sowie historische Informationen über weitere Produkte enthalten.

Anwendungsfälle

Im Anwendungsfall *CAD-Modell erstellen* wird die rechnerinterne Produktrepräsentation mit einer CAD-Software erstellt. Das Modell besitzt Informationen zur Produktstruktur und zur Geometrie sowie zum Material, welche später genutzt werden, um Verbräuche zu simulieren. Durch *CAD-Modell importieren* werden diese Informationen im Anwendungssystem bereitgestellt. Das CAD-Modell kann auch dazu genutzt werden, um die im Anwendungssystem generierten Informationen damit zu verknüpfen.

Mittels *CAM-Modell erstellen* wird das Ablaufprogramm der Produktionsmaschine erzeugt. Dieses wird durch *CAM-Modell importieren* in die Systemgrenze des Anwendungssystems gebracht. Im CAM-Modell sind Informationen zu Produktionsverfahren und den Einstellungen der Produktionsmaschine vorhanden, aus denen ein Verbrauch der Maschine simuliert werden kann.

Die Verbräuche der realen Produktion werden durch *Sensordaten erfassen* erzeugt. Dazu sind die Produktionsmaschinen mit entsprechender Sensorik zu versehen. Die Sensordaten müssen produktindividuell erfasst werden und werden mittels *Sensordaten importieren* in geeigneter Form in das Anwendungssystem transportiert. Beide Anwendungsfälle sind erst ab der Phase der Produktion möglich und daher grau hinterlegt.

Die drei Importe erweitern den Anwendungsfall *Verbräuche berechnen*. Sie werden dazu genutzt, die Verbräuche in den Phasen der Produktentstehung zu berechnen bzw. zu simulieren. Je nach Phase sind unterschiedliche Informationen vorhanden. So kann beispielsweise eine Verbrauchssimulation durch CAM-Daten vernachlässigt werden, wenn reale Messdaten der Produktion vorliegen.

Der zentrale Anwendungsfall ist *PCF berechnen*. Er setzt voraus, dass die Verbräuche berechnet wurden. Der Anwendungsfall besitzt neben anderen Assoziationen eine Assoziation zur Ökodatenbank, da hieraus Informationen bezogen werden müssen und auch wieder gespeichert werden können.

Der Anwendungsfall *Qualitätsmanagement durchführen* erweitert den Anwendungsfall *PCF berechnen*. Die Informationen zur Herkunft der Verbrauchsdaten und zur Berechnung liegen vor. Der Anwendungsfall kann sowohl durch den Nutzer als auch automatisiert durch den Digitalen Master bzw. Digitalen Zwilling ausgelöst werden.

3.4 Anforderungen

Auf der Grundlage des identifizierten Handlungsbedarfs, der Zieldefinition und des betrachteten Nutzungsszenarios werden in diesem Kapitel die Anforderungen an das Konzept abgleitet. Anforderungen werden nach ISO 9000 als ein Erfordernis oder eine Erwartung definiert, welche in drei Kategorien unterteilt sind: festgelegte, üblicherweise vorausgesetzte oder verpflichtende Anforderung [145]. Das Anforderungsprofil wird in die Teilbereiche allgemeine Anforderungen an das Konzept, Anforderungen an das Informationsmodell und Anforderung an die Implementierung gegliedert. Anschließend folgt eine Zusammenfassung in tabellarischer Form.

3.4.1 Allgemeine Anforderungen an das Konzept

Eine Ableitung der allgemeinen Anforderung an das Konzept erfolgt auf Basis des Handlungsbedarfs und der Zieldefinition.

Anforderung 1:

Das Konzept muss in den Phasen der Produktentstehung anwendbar sein.

Im Produktentstehungsprozess werden an vielen Stellen Entscheidungen getroffen, die Auswirkungen auf die Umweltbelastung des Produkts selbst und in der Produktion besitzen. Daher muss das Konzept in den Phasen Konzept, Entwurf, detailliertes Design, Arbeitsvorbereitung und Produktion anwendbar sein, um eine datenbasierte Entscheidungsunterstützung zu erzeugen.

Anforderung 2:

Das Konzept muss eine automatisierte Berechnung der Verbräuche durch einen Digitalen Master bzw. Digitalen Zwilling ermöglichen.

Um produktindividuelle Verbräuche zu berechnen, müssen unterschiedliche Informationen miteinander verknüpft und Berechnungen ausgeführt werden. Die manuelle Verknüpfung und Berechnung stellen einen großen Zeitaufwand dar, der sich bei der Produktion von mehreren Bauteilen vervielfältigt. Daher ist eine Automatisierung durch einen Digitalen Master bzw. Digitalen Zwilling erforderlich.

Anforderung 3:

Das Konzept muss Informationen und Methoden zur Berechnung eines PCF enthalten.

Die Berechnung des PCF ist eine Kernaufgabe in dieser Dissertation. Um diese Berechnung durchführen zu können, müssen die Informationen über verbrauchte Ressourcen bei der Herstellung des Produkts sowie die mathematischen Methoden einer Ökobilanz bereitgestellt werden.

Anforderung 4:

Im Konzept soll eine Differenzierung zwischen Datenquellen und eine Priorisierung der Datenquellen intergiert sein.

Da die Berechnung des PCF zu verschiedenen Zeitpunkten im Produktentwicklungsprozess ermöglicht werden soll, werden sowohl Primär- als auch Sekundärdaten aus Ökodatenbanken zur Berechnung genutzt. Das Konzept soll eine Trennung und Priorisierung vorsehen, um eine Empfehlung für die Verwendung einer Datenquelle zu liefern.

Anforderung 5:

Die Berechnung des PCF muss durch Dritte nachvollziehbar und reproduzierbar sein.

Wie im Stand der Technik dargelegt wird, ist eine Berechnung des PCF nicht immer nachvollziehbar, da individuelle Entscheidungen getroffen werden, die bei der Berechnung verloren gehen. Das Konzept muss eine Dokumentation der Berechnung ermöglichen, sodass Dritte die Ökobilanz mit dem gleichen Ergebnis reproduzieren können.

Anforderung 6:

Das Konzept muss ein Vorgehen zur Berechnung der Unsicherheit des PCF enthalten.

Die Unsicherheitsberechnung eines PCF wird oftmals vernachlässigt, obwohl die Streuung eine wichtige Entscheidungsgrundlage über die Aussagekraft des PCF liefert. Im Konzept müssen die Berechnung sowie ein allgemeines Vorgehen zur Berechnung integriert sein.

Anforderung 7:

Die Aussagekraft eines PCF soll untersuchbar und beschreibbar sein.

Neben der Unsicherheit gibt es weitere Faktoren, die eine Aussagekraft des PCF beeinflussen. Diese Einflüsse sollen untersucht werden, sodass eine Aussagekraft beschreibbar ist. Die Aussagekraft liefert eine zusätzliche Information zum PCF, aus der Rückschlüsse über eine weitere Verwendbarkeit des PCF gezogen werden können.

Anforderung 8:

Maßnahmen zur Steigerung der Aussagekraft eines PCF sollen ableitbar sein.

Es existieren verschiedene Maßnahmen, um die Aussagekraft eines PCF zu erhöhen. Diese Maßnahmen sollen aufgrund der zuvor beschriebenen Aussagekraft abgeleitet werden können.

Anforderung 9:

Der PCF muss mit dem Produktstruktur- und Geometriemodell verlinkt sein.

Eine Verknüpfung des PCF mit dem Produktstruktur- und Geometriemodell des Produkts liefert einen erheblichen Mehrwert in der Produktentstehung, da die Produktionsressourcen mit der spezifischen Entität in der Produktrepräsentation eine visuelle Darstellung der Zusammensetzung des PCF ermöglichen und somit die Hauptkomponenten des PCF und deren Ursprung direkt sichtbar sind.

3.4.2 Anforderungen an das Informationsmodell

Zur Umsetzung des Konzepts werden verschiedene Informationsquellen, Informationstypen und Methoden benötigt. Um diese Informationen und Methoden übersichtlich strukturieren und verwalten zu können, wird ein konzeptumfassendes Informationsmodell aufgebaut. Dieses ermöglicht eine geordnete Darstellung und Beschreibung von Objekten sowie deren Beziehungen. Das Informationsmodell unterliegt Anforderungen, die im Folgenden erläutert werden.

Anforderung 10:

Das Informationsmodell muss die benötigten Attribute des Konzepts in Klassen sowie Beziehungen der Klassen enthalten.

Das Informationsmodell stellt eine Abbildung der benötigten Attribute und Methoden des Konzepts dar. Die Beziehungen zwischen den Klassen des Informationsmodells zeigen an, an welcher Stelle Wechselwirkungen existieren und Informationen ausgetauscht werden können bzw. müssen.

Anforderung 11:

Das Informationsmodell muss über einen modularen Aufbau verfügen und Erweiterungen ermöglichen.

Ein modularer Aufbau des Informationsmodells schafft die Grundlage für eine Untergliederung in Teilbereiche und verbessert somit die Leserlichkeit. Im Falle einer Implementierung von Dritten, die das Informationsmodell als Grundlage nutzen wollen, können je nach individuellem Bedarf die Teilbereiche zusammengesetzt werden. Das Informationsmodell muss erweiterbar sein, wenn zusätzliche Informationen und Methoden in der Zukunft benötigt werden.

Anforderung 12:

Das Informationsmodell muss Informationen für die Methoden zur Berechnung eines PCF bereitstellen und die Ergebnisse enthalten.

Zur Berechnung des PCF können unterschiedliche Methoden genutzt werden. Diese sind im Informationsmodell abzubilden ebenso wie die dafür benötigten Informationen. Nach der Berechnung des PCF ist das Ergebnis im Informationsmodell zu speichern.

Anforderung 13:

Das Informationsmodell muss Informationen zur Durchführung eines Qualitätsmanagements beinhalten.

Die Durchführung eines Qualitätsmanagements erfordert eine Informationsgrundlage zur Berechnung und Datengrundlage des PCF sowie Informationen zum Ablauf einer Durchführung eines Qualitätsmanagements. Diese sind im Informationsmodell zu integrieren, sodass ein Qualitätsmanagement als Teil des Konzepts durchgeführt werden kann.

Anforderung 14:

Das Informationsmodell soll eine Analyse der Transparenz des PCF ermöglichen.

Sind Informationen zur Berechnung des PCF nicht bekannt oder gehen im Verlauf einer Berechnung verloren, müssen diese Informationslücken analysiert und behoben werden können.

Anforderung 15:

Das Informationsmodell soll Maßnahmen zur Steigerung der Qualität des PCF enthalten.

Bereits existierende Maßnahmen zur Steigerung der Aussagekraft des PCF sollen im Informationsmodell bereitgestellt werden, sodass diese je nach Anwendungsfall abrufbar sind und vorgeschlagen werden können, falls diese benötigt werden.

3.4.3 Anforderungen an die Implementierung

Die theoretische Modellierung des Gesamtkonzepts wird im Verlauf dieser Dissertation in eine prototypische Softwareapplikation überführt. Durch die Implementierung werden die Funktionalitäten des Konzepts auf eine Praxistauglichkeit überprüft und eine Möglichkeit der Umsetzung beschrieben. Die Anforderungen an die Implementierung lauten wie folgt.

Anforderung 16:

Das Anwendungssystem muss CAD-Dateien importieren können.

In der Konstruktionsphase des Produktentstehungsprozesses sind keine Primärdaten des Produkts vorhanden, da dieses ausschließlich digital existiert. Aus dem CAD-Modell lassen sich Größen ableiten, die für eine Verbrauchssimulation benötigt werden. Weiterhin wird das CAD-Modell genutzt, um Informationen zu verlinken. Daher muss dieses von der Anwendung importiert werden können.

Anforderung 17:

Das Anwendungssystem muss CAM-Programme importieren können.

Eine Simulation der Verbräuche kann durch die Analyse eines CAM-Programms erfolgen. Durch den Import des CAM-Programms soll eine genauere Verbrauchssimulation als auf Basis des CAD-Modells stattfinden, ohne dass das Produkt gefertigt werden muss.

Anforderung 18:

Das Anwendungssystem muss Sensordaten importieren können.

Die Primärdaten aus der Produktion werden benötigt, um die realen Verbräuche im Produktentstehungsprozess zu berechnen. Es handelt sich dabei um die Sensordaten, die aus an Produktionsmaschinen angebrachter Sensorik resultieren. sind. Je nach Produktionsmaschine werden unterschiedliche Daten erhoben. Das Anwendungssystem muss die aufbereiteten Sensordaten der Maschinen importieren und diese dem Produkt zuweisen können.

Anforderung 19:

Das Anwendungssystem muss Eingabedaten eines Nutzers verarbeiten können.

Das CAD-Modell und die Primärdaten liefern zur Berechnung des PCF benötigte Informationen. Da es weitere Informationen gibt, die nicht mit dem CAD-Modell und den Primärdaten geliefert werden können, muss das Anwendungssystem Eingaben eines Benutzers zulassen. Somit können Informationslücken geschlossen werden.

Anforderung 20:

Die Programmiersprachen und Werkzeuge sollen plattformneutral sein.

Das Konzept sieht eine Integration in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling vor. Da ein Digitaler Master bzw. Digitaler Zwilling auf unterschiedliche Art und Weise sowie auf der Grundlage unterschiedlicher Plattformen erstellt werden kann, sollen in der Implementierung neutrale Programmiersprachen und Werkzeuge genutzt werden. Dadurch kann eine breite Anwendungsmöglichkeit des Konzepts garantiert werden.

Anforderung 21:

Das Anwendungssystem muss einen PCF berechnen können.

Die Berechnung der Kennzahl PCF ist eine Kernaufgabe in dieser Dissertation und muss daher im Anwendungssystem durchführbar sein.

Anforderung 22:

Das Anwendungssystem muss eine Schnittstelle zu einer Ökodatenbank besitzen oder diese integrieren.

Zur Berechnung des PCF werden eine oder mehrere Ökodatenbanken benötigt. Es existieren unterschiedliche Typen von Ökodatenbanken. Über die Bereitstellung einer geeigneten Schnittstelle im Anwendungssystem können die benötigten Datensätze importiert werden. Eine weitere Möglichkeit ist die direkte Integration der Datenbank in das Informationsmodell. Eine der beiden Möglichkeiten muss im Anwendungssystem vorhanden sein.

Anforderung 23:

Das Anwendungssystem muss eine graphische Benutzungsoberfläche besitzen.

Eine graphische Benutzungsoberfläche ermöglicht eine Interaktion des Nutzers mit dem Anwendungssystem. Darunter fällt die Importfunktion der benötigten Modelle, wie beispielsweise dem CAD-Modell, aber auch die Eingabe von ergänzenden Informationen. Die Benutzungsoberfläche dient darüber hinaus zur Darstellung von Einstellungsmöglichkeiten und Ergebnissen.

Anforderung 24:

Das Anwendungssystem soll eine Schnittstelle für andere Softwaresysteme besitzen.

Da im Digitalen Zwilling verschiedene Softwaresysteme miteinander agieren können, soll das Anwendungssystem eine Schnittstelle aufweisen. Eine Schnittstelle ermöglicht

beispielsweise den direkten Erhalt von Primärdaten aus einer Produktion. Durch die Schnittstelle kann das Konzept zukünftig erweitert werden.

Anforderung 25:

Das Anwendungssystem soll eine graphische Darstellung der Zusammensetzung des PCF ermöglichen.

Da sich der Gesamtwert des PCF in seine Bestandteile unterteilen lässt, sollte diese Zusammensetzung im Anwendungssystem informativ dargestellt sein. Somit können Hauptbestandteile identifiziert werden, welche eine Grundlage zur Nutzung des PCF für Entscheidungen im Produktentstehungsprozess liefern.

3.4.4 Zusammenfassung der Anforderungen

Die aufgestellten Anforderungen werden als übersichtliches Anforderungsprofil in der Tabelle 3-1 dargestellt. Neben der Nummer und der Bezeichnung der Anforderung wird zusätzlich eine Kategorisierung in Festanforderung (F) und Wunschanforderung (W) vorgenommen, wie sie als minimale Priorisierung von Anforderungen in Pahl/Beitz Konstruktionslehre beschrieben ist [229]. Festanforderungen müssen im Entwicklungsprozess zwingend beachtet und in der Umsetzung erfüllt werden. Wunschanforderungen sollen, aber müssen nicht beachtet und erfüllt werden.

Tabelle 3-1: Anforderungsprofil an das Konzept

Nr.	Art	Bezeichnung
Allgemeine Anforderungen an das Konzept		
1	F	Das Konzept muss in den Phasen der Produktentstehung anwendbar sein.
2	F	Das Konzept muss eine automatisierte Berechnung der Verbräuche durch einen Digitalen Master bzw. Digitalen Zwilling ermöglichen.
3	F	Das Konzept muss Informationen und Methoden zur Berechnung eines PCF enthalten.
4	W	Im Konzept soll eine Differenzierung zwischen Datenquellen und eine Priorisierung der Datenquellen intergiert sein.
5	F	Die Berechnung des PCF muss durch Dritte nachvollziehbar und reproduzierbar sein.

Tabelle 3-1: Anforderungsprofil an das Konzept

Nr.	Art	Bezeichnung
6	F	Das Konzept muss ein Vorgehen zur Berechnung der Unsicherheit des PCF enthalten.
7	W	Die Aussagekraft eines PCF soll untersuchbar und beschreibbar sein.
8	W	Maßnahmen zur Steigerung der Aussagekraft eines PCF sollen ableitbar sein.
9	F	Der PCF muss mit dem Produktstruktur- und Geometriemodell verlinkt sein.
Anforderungen an das Informationsmodell		
10	F	Das Informationsmodell muss die benötigten Attribute des Konzepts in Klassen sowie Beziehungen der Klassen enthalten.
11	F	Das Informationsmodell muss über einen modularen Aufbau verfügen und Erweiterungen ermöglichen.
12	F	Das Informationsmodell muss Informationen für die Methoden zur Berechnung eines PCF bereitstellen und die Ergebnisse enthalten.
13	F	Das Informationsmodell muss Informationen zur Durchführung eines Qualitätsmanagements beinhalten.
14	W	Das Informationsmodell soll eine Analyse der Transparenz des PCF ermöglichen.
15	W	Das Informationsmodell soll Maßnahmen zur Steigerung der Qualität des PCF enthalten.
Anforderungen an die Implementierung		
16	F	Das Anwendungssystem muss CAD-Dateien importieren können.
17	F	Das Anwendungssystem muss CAM-Programme importieren können.
18	F	Das Anwendungssystem muss Sensordaten importieren können.
19	F	Das Anwendungssystem muss Eingabedaten eines Nutzers verarbeiten können.
20	W	Die Programmiersprachen und Werkzeuge sollen plattformneutral sein.

Tabelle 3-1: Anforderungsprofil an das Konzept

Nr.	Art	Bezeichnung
21	F	Das Anwendungssystem muss einen PCF berechnen können.
22	F	Das Anwendungssystem muss eine Schnittstelle zu einer Ökodatenbank besitzen oder diese integrieren.
23	F	Das Anwendungssystem muss eine graphische Benutzungsoberfläche besitzen.
24	W	Das Anwendungssystem soll eine Schnittstelle für andere Softwaresysteme besitzen.
25	W	Das Anwendungssystem soll eine graphische Darstellung der Zusammensetzung des PCF ermöglichen.

Legende: F = Festanforderung; W = Wunschanforderung

4 Konzept zur Integration des CO_2-Fußabdrucks von Produkten in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling

Auf Basis der im Kapitel 2 durchgeführten Analyse des Stands der Technik und des im Kapitel 3 abgeleiteten Handlungsbedarfs sowie dem aufgestellten Anforderungsprofil wird in diesem Kapitel das Konzept zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling vorgestellt. Der Kern des Konzepts ist die Berechnung und Speicherung des PCF in der Produktentstehung. Dies umfasst die Phasen Konzept, Entwurf, detailliertes Design, Arbeitsvorbereitung und Produktion.

Das Konzept beinhaltet ein Informationsmodell, welches die Informationen und Methoden zur Berechnung eines PCF bereitstellt. Das Ergebnis der Berechnung wird um zusätzliche Informationen erweitert, wie beispielsweise die Unsicherheit und die Qualitätsbewertung des Kennwerts. Die zusätzlichen Informationen tragen dazu bei, dass der PCF eine verlässliche Basis zur Entscheidungsunterstützung liefert und somit die Entscheidungsqualität erhöht wird.

Im ersten Teil des vorliegenden Kapitels werden die Begrifflichkeiten, die zum einheitlichen Verständnis des Konzepts benötigt werden, definiert. Es folgt eine Beschreibung der konzeptionellen Vorgehensweise, an deren Ende die untersuchten Forschungsfragen aufgestellt werden. Anschließend wird die Struktur beschrieben, die einen allgemeinen Überblick über das Gesamtkonzept liefert. Das Kernelement des Kapitels ist die detaillierte Entwicklung des Informationsmodells, welches auf die Konzeptstruktur folgt. Innerhalb des Informationsmodells wird ein Bottom-Up-Ansatz verfolgt. Zunächst werden das Kernmodell und die drei Partialmodelle mit Informationen, Methoden und Prozessen beschrieben, indem die Informationen, Methoden und Prozesse ausführlich dargestellt werden. Die Teilmodelle werden anschließend zu einem Gesamtmodell zusammengefügt.

4.1 Begriffsdefinitionen

Zur Beschreibung des Konzepts werden Begrifflichkeiten genutzt, die in diesem Unterkapitel definiert werden. Die Definitionen tragen zu einem konsistenten Verständnis der konzeptionellen Umsetzung bei und gelten für das gesamte Konzept der Dissertation. Die Begriffe werden im Rahmen dieser Dissertation wie folgt festgelegt:

Digitaler Master: Der Digitale Master entsteht während der Produktentwicklung und beinhaltet das Produktstrukturmodell, das Geometriemodell, Simulationen sowie verhaltensbeschreibende Modelle des Produkts [31].

Digitaler Zwilling: Der Digitale Zwilling ist ein virtuelles Abbild von einer mikroskopischen bis zu einer makroskopischen Ebene des physischen Zwillings und erstreckt sich über mehrere Lebensphasen einer Produktinstanz. Er existiert ab dem Zeitpunkt der Produktion. Mittels Sensorik wird der aktuelle Zustand des physischen Zwillings erfasst und auf den Digitalen Zwilling übertragen. Hierbei ist der Abruf historischer Daten möglich. Eine bidirektionale Verbindung ermöglicht einen Daten- und Informationsfluss vom Digitalen Zwilling zurück zum physischen Zwilling.

Primärdaten: Primärdaten bestehen aus einem oder mehreren quantifizierbaren Werten eines Prozesses oder einer Tätigkeit, die direkt durch Sensorik gemessen werden oder die sich aus einer Berechnung aufgrund direkter Messungen ergeben [104].

Sekundärdaten: Als Sekundärdaten werden Daten klassifiziert, die die Anforderungen an Primärdaten nicht erfüllen. Darunter fallen Daten aus Datenbanken und veröffentlichter Literatur, Daten aus Datenblättern von Maschinen, Standard-Emissionsfaktoren aus nationalen Sachbilanzen, berechnete Daten, Schätzwerte oder andere repräsentative Daten [104].

Sekundärdaten aus Simulationsdaten: Statische Daten, die aus der digitalen Analyse eines Geometriemodells abgeleitet werden können wie beispielsweise das Volumen, werden als Sekundärdaten aus Simulationsdaten bezeichnet. Es können auch dynamische Daten aus der Analyse von CAM-Programmierungen erhoben werden, die ebenfalls im Kontext dieser Dissertation als Simulationsdaten bezeichnet werden.

Verbräuche: Verbräuche beschreiben die genutzten Ressourcen zur Herstellung oder Nutzung eines Produkts. Darunter zählen Material wie das Rohmaterial eines Frästeils und Hilfsstoffe wie Kühlschmierstoff oder Benzin. Energie, beispielsweise in Form von elektrischer Energie, wird in dieser Dissertation zur einheitlichen Bündelung von genutzten Ressourcen zu den Verbräuchen gezählt. Dabei kann Energie im wissenschaftlichen Sinn nicht „verbraucht“, sondern ausschließlich umgewandelt werden, da der Energieerhaltungssatz allgemeine Gültigkeit besitzt [230].

Product Carbon Footprint (PCF): Der CO_2-Fußabdruck eines Produkts wird nach ISO 14067 definiert als Summe der emittierten THG-Mengen und der entzogenen THG-Mengen in einem Produktsystem, angegeben als CO_2-Äquivalente und beruhend auf einer

Ökobilanz unter Nutzung der Wirkungskategorie Klimawandel [104]. Wird nur ein Prozess oder ein Abschnitt im PLZ bilanziert, wird die Summe der emittierten THG-Mengen und der entzogenen THG-Mengen als pPCF (pPCF) bezeichnet.

Provenienz: Als Provenienz wird die Identifikation, Beschreibung und Darstellung von detaillierten Informationen über die Herkunft und Authentizität vorliegender Daten bezeichnet [190]. Durch eine Aufzeichnung werden Daten und Berechnungen sowie deren verantwortlicher Verfasser und der Zeitpunkt zur späteren Nachvollziehbarkeit und Analyse dokumentiert.

Aussagekraft: Die Aussagekraft beschreibt die Eigenschaft einer Information, inwieweit sie präzise, qualitative und verlässliche Erkenntnisse vermittelt. Eine aussagekräftige Information ist eindeutig, vollständig und besitzt eine kontextbezogene Bedeutung. Einen Einfluss auf die Aussagekraft haben die Datenqualität, die Unsicherheit des Ergebnisses und der Datenursprung.

4.2 Konzeptionelle Vorgehensweise

Ziel dieser Dissertation ist die Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling. Der PCF soll in der Produktentstehung quantifizierbar sein. Um dieses Ziel zu erfüllen, muss zunächst beschrieben werden, welche Informationen zur Berechnung des PCF vorhanden sein müssen. Die Informationsgrundlage variiert in den einzelnen Phasen der Produktentstehung, sodass ein Kernelement des Konzepts darin besteht, die benötigten Informationen in den einzelnen Phasen der Produktentstehung für eine PCF Berechnung zu ermitteln und bereitzustellen. Mit dem Voranschreiten der Produktentstehung können zunehmend bauteilspezifische Daten erhoben werden bis hin zu Primärdaten aus den Fertigungsprozessen. Diese Daten repräsentieren die Umweltauswirkung des Produkts in einem höheren Grad als Sekundärdaten. Innerhalb des Konzepts wird daher eine Bevorzugung der Primärdaten berücksichtigt, indem der Ansatz in einer kaskadierenden Entscheidungsmethodik beschrieben wird. Diese Entscheidungsmethodik ist der Ausgangspunkt zur Berechnung des PCF.

Grundlegend lässt sich das Konzept in vier Teile untergliedern, zwischen denen ein Informationsaustausch stattfindet. Den ersten Teil bildet das Kernmodell des Konzepts, in dem die Berechnung und Speicherung des PCF inklusive Unsicherheit beschrieben wird (Kernmodell PCF). Neben den aufgestellten Gleichungen zur Berechnung des PCF und dessen Unsicherheit werden dort die benötigten Informationen aufgeführt, welche im zweiten Teil – dem Partialmodell Ökodaten – bereitgestellt werden. Im dritten Teil wird der PCF bezüglich seiner Qualität im Partialmodell PCF Qualität beschrieben, analysiert

und eine Aussagekraft ermittelt. Der vierte Teil beschreibt die Provenienz der PCF Daten sowie Berechnungen und kann daher als Protokoll zuvor durchgeführten Aktivitäten verstanden werden (Partialmodell PCF Provenienz). Innerhalb des Konzepts werden prozess- und aktivitätsorientierte Ansätze verfolgt, welche Interaktionen und einen komplexen Informationsfluss zwischen den Teilen erfordern. Zusammengefasst ergeben die vier Teile ein Gesamtmodell zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling, welches im fünften Teil beschrieben wird. Dieses Gesamtmodell wird durch ein strukturiertes Informationsmodell repräsentiert, welches in einer objektorientierten Methodik dargestellt wird. Das Gesamtmodell besteht aus Klassen mit Attributen sowie Methoden und zeigt die Kommunikation zwischen den Klassen auf. Insgesamt betrachtet besteht das Informationsmodell aus Struktur- und Verhaltensdiagrammen, die einer Aufteilung in die Phasen Anforderungen, Analyse, Entwurf und Implementierung unterliegen [231].

Zur Visualisierung des Konzepts wird die graphische Modellierungssprache UML genutzt. Diese wird von der OBJECT MANAGEMENT GROUP (OMG) stetig weiterentwickelt und ist darüber hinaus in der ISO/IEC 19505 für die Version 2.4.1 genormt [232]. In dieser Dissertation wird UML in der Version 2.5 verwendet [228]. Ziel der UML ist es, Systemarchitekten, Softwareingenieuren und Softwareentwicklern Werkzeuge für die Analyse, den Entwurf und die Implementierung von softwarebasierten Systemen sowie für die Modellierung von Geschäfts- und ähnlichen Prozessen zur Verfügung zu stellen [232]. Es finden zwei Diagrammtypen im Konzept dieser Dissertation Anwendung: Das UML-Klassendiagramm und das UML-Aktivitätsdiagramm. Das UML-Klassendiagramm zählt zu den Strukturdiagrammen und beschreibt die statische Struktur des abzubildenden Systems [233]. Es enthält Strukturzusammenhänge sowie Datentypen und bildet eine Brücke zu dynamischen Diagrammen [233]. Das UML-Aktivitätsdiagramm zählt zu den Verhaltensdiagrammen. Dort werden Abläufe mit Bedingungen, Schleifen und Verzweigungen detailliert abgebildet [233]. Das UML-Aktivitätsdiagramm eignet sich zur Parallelisierung und Synchronisation von Abläufen. Ein Mehrwert der Darstellung mittels UML ist, dass Projektbeteiligte das Konzept auf einer Abstraktionsebene ohne Verständnis über eine detaillierte Implementierung mitgestalten und interpretieren können [234]. Neben der grafischen Darstellungsform des Konzepts mit der Modellierungssprache UML wird diese Dissertation von übergeordneten Forschungsfragen geleitet, die im Folgenden beschrieben werden.

Forschungsfragen:

Aufgrund des wissenschaftlichen Handlungsbedarfs, der in Kapitel 3.1 als Folge des analysierten Stands der Technik ermittelt wird, und der Zieldefinition aus Kapitel 3.2 werden Forschungsfragen abgeleitet, die im Konzept adressiert werden sollen.

1) Wie kann der PCF inklusive Unsicherheit in den Phasen der Produktentstehung quantifiziert werden? Wie können Verbräuche zur Berechnung des PCF automatisiert ermittelt werden?
2) Wie kann eine Verknüpfung zwischen PCF und dem Produktstruktur- und Geometriemodell hergestellt werden?
3) Wie kann die Qualität des PCF ermittelt und anschließend zur Erhöhung einer Aussagekraft genutzt werden?
4) Wie kann der PCF transparent und nachvollziehbar kommuniziert werden, sodass Schwachstellen als Grundlage für Verbesserungen auffindbar sind?

Die aufgestellten Forschungsfragen sollen zur Erfüllung der Anforderungen aus Kapitel 3.4 beitragen und werden in den folgenden Kapiteln in mehreren Schritten adressiert. Das Konzept, dessen Aufbau in Kapitel 4.4.1 beschrieben wird, orientiert sich an der Struktur eines Kernmodells mit drei ergänzenden Partialmodellen.

4.3 Einordnung des Konzepts

In diesem Kapitel wird das Gesamtkonzept zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling als Informationsmodell vorgestellt. Die Integration in den Digitalen Master ermöglicht eine Berechnung des PCF aufgrund der Ergebnisse der Produktentwicklung. Ab der Phase der Produktion kann durch Primärdaten, die durch den Digitalen Zwilling bereitgestellt werden, eine produktindividuelle Berechnung erfolgen. Ergänzend zur PCF Berechnungen erfolgt eine Unsicherheitsberechnung und ein Qualitätsmanagement. Die Ergebnisse können anschließend innerhalb des Digitalen Masters bzw. Digitalen Zwillings mit dem Produktstruktur- und Geometriemodell verknüpft werden und sind dort als Kennzahl zur ökologischen Umweltauswirkung des Produkts eingebettet. Die Abbildung 4-1 zeigt die Einordnung des Ansatzes dieser Dissertation in die integrierte Produkt- und Prozessentwicklung nach ABELE ET AL. [235], die um die Phase der Arbeitsvorbereitung ergänzt wird. Der Grundgedanke liegt in der Trennung zwischen den Phasen der Produktentwicklung und den Phasen des Produktlebenswegs. Zwischen den Phasen der Produktentwicklung und den Phasen des Produktlebenswegs findet ein Informationsfluss in Form einer Antizipation der Prozesse in der Produktentstehung und einer Beeinflussung der Produktenwicklung durch den Produktlebensweg

statt. Nach der Klärung der Aufgabe wird das Produkt in der Produktentwicklung konzipiert. Ab diesem Zeitpunkt liegen Informationen zur Gestalt des Produkts im Digitalen Master vor und es kann eine Abschätzung des PCF getroffen werden. An dieser Stelle findet das Konzept Anwendung und das Modul zur Berechnung des PCF wird bereitgestellt. Da in der Konzept- und Entwurfsphase in der Regel nur Annahmen getroffen werden, existieren wenige verlässliche Informationen über die spätere physische Ausgestaltung des Produkts. Es ist folglich umso wichtiger, ein Qualitätsmanagement zum PCF durchzuführen. Die Schritte zur Berechnung und zum Qualitätsmanagement werden durch das Modul PCF Provenienz protokolliert und können im Anschluss nachverfolgt werden.

In der Phase des detaillierten Designs werden CAD-Modelle genutzt, um die Informationen zum Material und Volumen auszulesen, die zuvor lediglich schätzbar waren. In der Arbeitsvorbereitung entstehen Simulationen der Fertigungsprozesse etwa durch die Nutzung von CAM-Programmen. Über virtuelle Maschinensimulationen werden Aussagen über Verbräuche der Produktionsmaschine und den Bedarf an Rohmaterial formulierbar. Die tatsächlichen Verbräuche können erst zum Zeitpunkt der Produktion über den Digitalen Schatten bereitgestellt werden. Die Module der PCF Berechnung mit Ökodaten, PCF Qualitätsmanagement und PCF Provenienz können als neue Komponenten im Digitalen Zwilling verstanden und genutzt werden. Der gewählte Ansatz des Konzepts umfasst eine Bilanzierung des PCF bis zum Verlassen der Werkshalle im Produktlebensweg („cradle to gate“).

Zur systematischen Beschreibung des Konzepts wird die Form eines Informationsmodells gewählt. Das Informationsmodell wird in dieser Dissertation als stark strukturierte, textuelle Beschreibung verstanden, welche die Semantik der Problemdomäne darlegt und durch eine graphische Notation unterstützt wird, um einen Überblick über das Konzept zu geben [236]. Für die graphische Darstellung wird die UML-Notation 2.5 gewählt, deren Grundzüge in Kapitel 4.2 beschrieben werden. Die benutzten Diagrammtypen sind das UML-Aktivitätsdiagramm und das UML-Klassendiagramm. Zur genauen Bedeutung der genutzten graphischen Elemente in der UML-Notation sei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen [228].

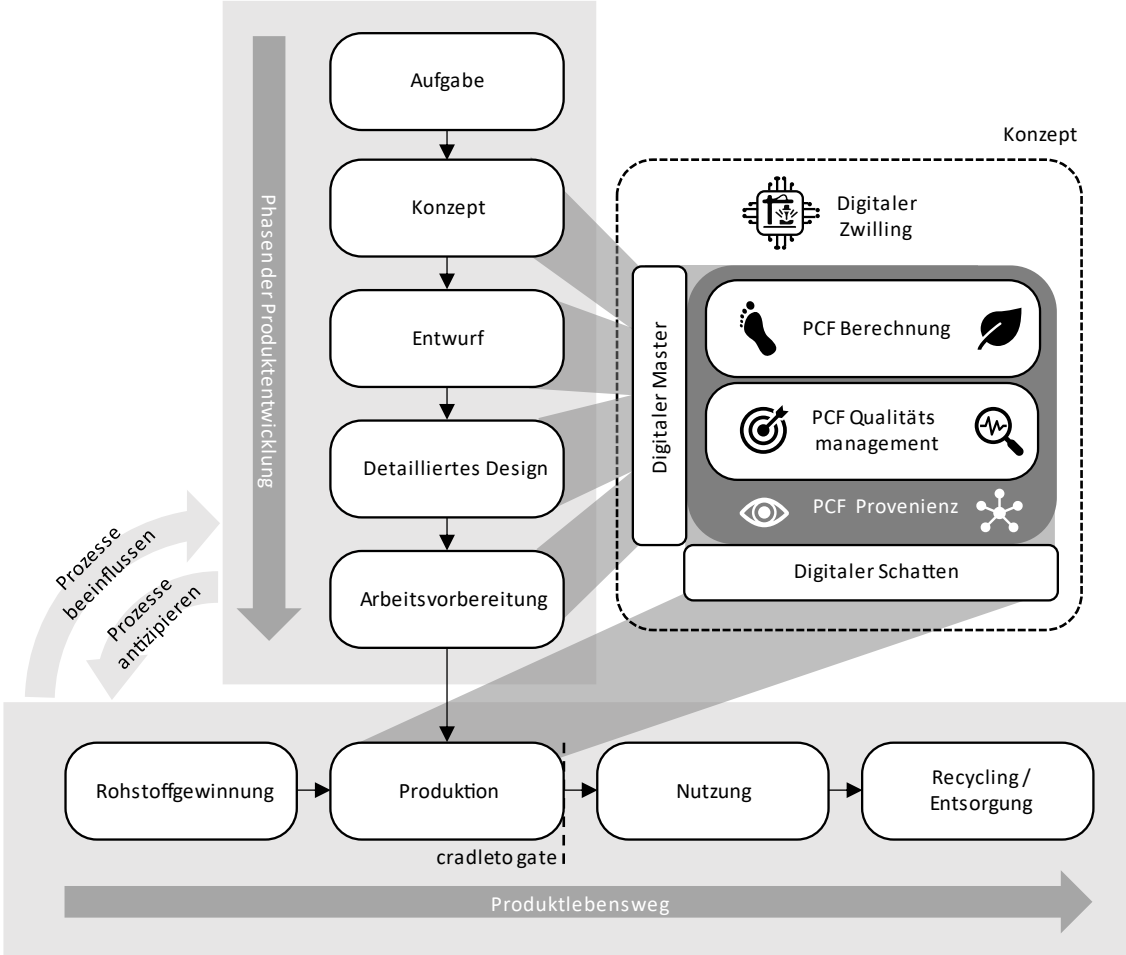


Abbildung 4-1: Einordnung des Konzepts in die integrierte Produkt- und Prozessentwicklung

4.4 Informationsmodell zur Integration des CO_2-Fußabdrucks von Produkten in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling

Die Beschreibung des Konzepts erfolgt nach einer systematischen Vorgehensweise und wird in mehrere Unterkapitel aufgeteilt. Die Struktur ist in Tabelle 4-1 zu sehen. Aufbauend auf den Begriffsdefinitionen aus Kapitel 4.1, der vorgestellten konzeptionellen Vorgehensweise in Kapitel 4.2 und der Einordnung des Konzepts in Kapitel 4.3 folgt in diesem Kapitel das Informationsmodell zur Integration des CO_2-Fußabdrucks von Produkten in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling, welches den wissenschaftlichen Kern dieser Dissertation bildet. Das Kapitel wird in sechs Unterkapitel aufgeteilt: Zunächst erfolgt die Beschreibung des Aufbaus des Informationsmodells in Kapitel 4.4.1, welches einen Überblick über die Teile des Informationsmodells gibt. Das Informationsmodell setzt sich anschließend aus vier Teilen zusammen. Den ersten Teil bildet das Kernmodell PCF in Kapitel 4.4.2, gefolgt von drei Partialmodellen. Das Kernmodell und die Partialmodelle besitzen jeweils Informationsmodelle, welche auch unabhängig voneinander

genutzt werden können. Das erste Partialmodell Ökodaten wird in Kapitel 4.4.3 beschrieben. Es folgen die Erläuterungen zum Partialmodell PCF Qualität in Kapitel 4.4.4 und zum Partialmodell PCF Provenienz in Kapitel 4.4.5. Anschließend werden die Teile zu einem Gesamtmodell in Kapitel 4.4.6 zusammengeführt, welches zuvor in Kapitel 4.4.1 beschrieben wird. Am Ende des Kapitels erfolgt ein Fazit und eine Zusammenfassung des Konzepts in Kapitel 4.5.

Tabelle 4-1: Konzeptstruktur des Informationsmodells

<table>
<tr><td colspan="4">4.1 Begriffsdefinition</td></tr>
<tr><td colspan="4">4.2 Konzeptionelle Vorgehensweise</td></tr>
<tr><td colspan="4">4.3 Einordnung des Konzepts</td></tr>
<tr><td rowspan="4">4.4 Informationsmodell zur Integration des CO_2-Fußabdrucks von Produkten in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling</td><td colspan="3">4.4.1 Aufbau des Informationsmodells</td></tr>
<tr><td colspan="3">4.4.2 Kernmodell PCF</td></tr>
<tr><td>4.4.3 Partialmodell Ökodaten</td><td>4.4.4 Partialmodell PCF Qualität</td><td>4.4.5 Partialmodell PCF Provenienz</td></tr>
<tr><td colspan="3">4.4.6 Integration der Teilmodelle in ein Gesamtmodell</td></tr>
<tr><td colspan="4">4.5 Fazit und Zusammenfassung</td></tr>
</table>

4.4.1 Aufbau des Informationsmodells

Das Informationsmodell zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling wird in vier Teile untergliedert, um den wissenschaftlichen Handlungsbedarf und die daraus abgeleiteten Forschungsfragen zu adressieren. Das Gesamtmodell und die vier Elemente sind in Abbildung 4-2 veranschaulicht und werden im Folgenden übersichtlich beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung der Teile folgt anschließend in den Unterkapiteln.

Das Kernmodell PCF geht der Frage nach, wie der PCF inklusive Unsicherheit quantifiziert werden kann. Die Berechnungsgrundlagen des PCF sind dabei keine Neuerungen, allerdings zeigt sich bei der Ermittlung des PCF in der praktischen Anwendung, dass die Kennzahl entweder nach der Produktion mittels Ökobilanzierungssoftware oder in einer simplifizierten Form in CAD-Softwaretools berechnet wird. Die Kennzahl spiegelt dabei meist den Durchschnittswert wider, da die Bilanzierung einzelner Produkte erhöhten Mehraufwand durch die Aufnahme produktspezifischer Primärdaten bedeutet. Das

Kernmodell beschreibt ein Informationsmodell für die Bilanzierung des PCF in der Produktentstehung. Da zu den verschiedenen Zeitpunkten unterschiedliche Informationen zur Verfügung stehen, wird zunächst erläutert, wie eine Auswahl der Informationen durch eine kaskadierende Entscheidungslogik getroffen werden kann und welche mathematischen Gleichungen genutzt werden müssen. Je nach Informationsgrundlage kann anschließend die Berechnung des PCF durchgeführt werden.

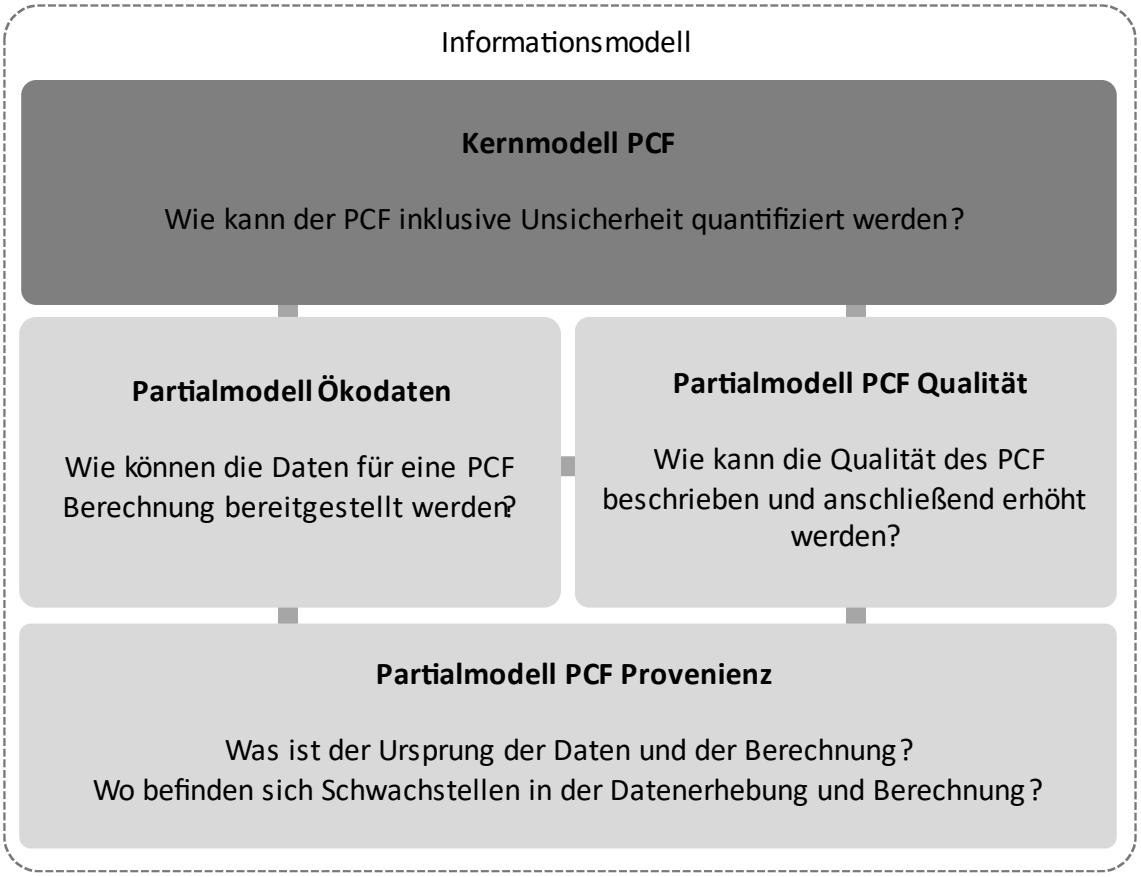


Abbildung 4-2: Elemente des Informationsmodells zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling mit dem Kernmodell PCF und dessen Verbindung zu den Partialmodellen

Neben der eigentlichen Quantifizierung des PCF wird dieser durch die Unsicherheitsberechnung erweitert. Die Ermittlung der Unsicherheit wird in der industriellen Anwendung meist vernachlässigt, da dies einen deutlichen Mehraufwand bedeutet. Innerhalb des Kernmodells wird das Vorgehen zur Unsicherheitsermittlung detailliert beschrieben, welches sich aufgrund der vorhandenen Verbrauchsdaten in der Vorgehensweise voneinander unterscheidet. Es wird zwischen einer Berechnung mit Primärdatenanteil und Sekundärdatenanteil differenziert. Um die Berechnung zu vereinfachen, wird das Vorgehen jeweils durch die Aufspaltung in Operanden beschrieben, die sich aus Verbrauchswert und Umrechnungsfaktor zusammensetzen. Somit kann eine Basis geschaffen wer-

den, wie die Unsicherheitsberechnung automatisiert und zusätzlich zu jeder PCF Berechnung durchgeführt werden kann. In der Unsicherheitsberechnung ist zudem die Auswahl für ein Berechnungsverfahren zu treffen, welches je nach Anwendungszweck und Datenlage einen unterschiedlichen Nutzen bietet.

Das Partialmodell Ökodaten beinhaltet die Ergebnisse einer Methodik zur Bereitstellung produktspezifischer Verbrauchsdaten, die im Kernmodell zur Berechnung des PCF genutzt werden. Je nach Phase der Produktentstehung lassen sich verschiedene Arten von Daten erheben. Zunächst wird im Partialmodell erläutert, wie Primärdaten aufgenommen und an den Digitalen Zwilling übergeben werden können. Dies kann angewendet werden, wenn die Produktentwicklung abgeschlossen ist und das Produkt physisch produziert wird. Anschließend folgt das methodische Vorgehen zur Erhebung von Sekundärdaten aus Simulationsdaten. Sekundärdaten aus Simulationsdaten werden genutzt, wenn die Aufnahme von Primärdaten nicht möglich ist oder das Produkt sich in der Phase der Produktentwicklung befindet. Sekundärdaten aus Simulationsdaten nähern die Verbräuche eines Fertigungsprozesses an und sind vor Sekundärdaten, die Durchschnittsverbräuche beschreiben, zu bevorzugen. Im Partialmodell wird zwischen drei Stufen einer Erhebung von Sekundärdaten aus Simulationsdaten unterschieden, die eine Spanne zwischen einem generischen und einem maschinenspezifischen Ansatz aufmachen. Darüber hinaus wird im Partialmodell beschrieben, wie Sekundärdaten aus Ökodatenbanken eingebunden werden können, falls Primär- und Sekundärdaten aus Simulationsdaten nicht verfügbar sind.

Das Partialmodell PCF Qualität zielt auf das Qualitätsmanagement ab, welches im Anschluss an die PCF Berechnung durchgeführt werden kann. Zunächst findet eine Untersuchung der Zusammensetzung des PCF statt. Die Formeln zum Verhältnis der Anteile an Primär- und Sekundärdaten werden aufgestellt und erläutert. Es folgt eine Untersuchung des PCF auf die Datenqualität der einzelnen Operanden der Berechnung. Aufbauend auf Literaturwerten werden Tabellen zur Beschreibung der Datenqualität von Primär- und Sekundärdaten bereit gestellt. Einen Einfluss auf die Datenqualität hat unter anderen Kategorien auch die Unsicherheit, die im Kernmodell berechnet wird. Anschließend können die einzelnen Werte gruppiert und mit den zuvor berechneten Anteilen des Datenursprungs zur neu entwickelten Kennzahl der Aussagekraft zusammengefasst werden. Darüber hinaus werden exemplarisch Maßnahmen vorgestellt, die zur Erhöhung der Aussagekraft führen können.

Der Teil PCF Provenienz beschreibt die Herkunft der Daten des PCF. Das Partialmodell kann als Protokollierung aller Aktivitäten verstanden werden, indem die Informationen zu den Aktivitäten als Provenienzdaten gespeichert werden. Aus diesen Daten lassen

sich nach Durchführung der PCF Berechnung ein Sankeydiagramm und ein Provenienzgraph erstellen. Beide sind Visualisierungen mit Knoten und Kanten, die eine intuitive Informationserweiterung zur Analyse des PCF erlauben. Durch das Partialmodell kann beispielsweise die Berechnung auf Schwachstellen und Konsistenz geprüft werden.

In den folgenden Unterkapiteln werden das Kernmodell und die Partialmodelle beschrieben. Die Inhalte des jeweiligen Informationsmodells und die Verbindung zwischen den Teilen sind in der Abbildung 4-3 zu sehen:

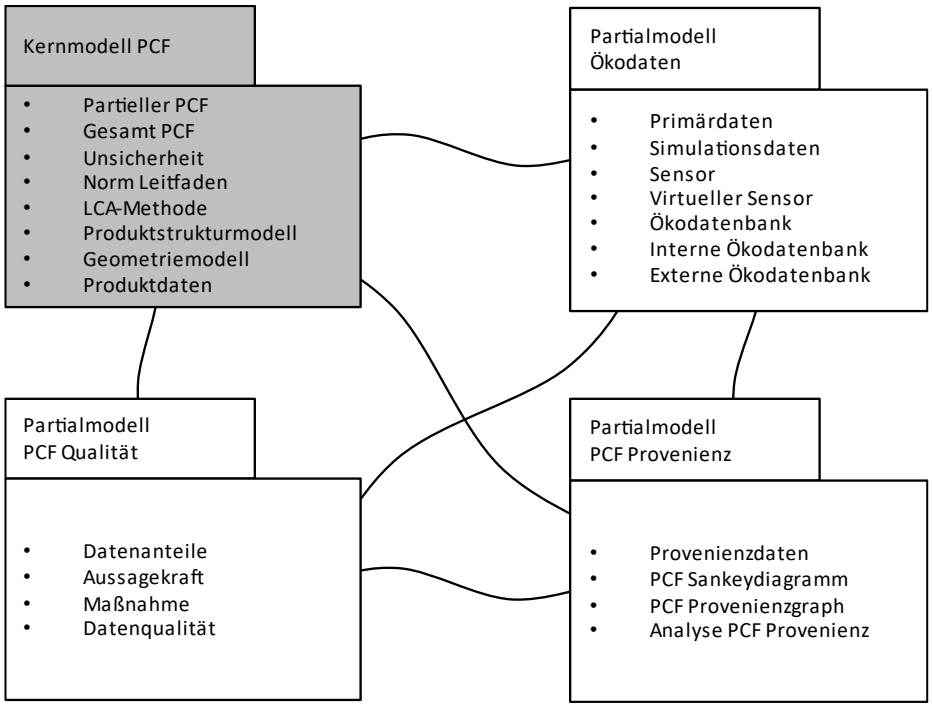


Abbildung 4-3: Schematische Struktur des Informationsmodells

4.4.2 Kernmodell PCF

Das Kernmodell PCF repräsentiert die Informationen und Methoden, die zur Ermittlung der CO_2-Äquivalente eines Produkts in der Produktentstehung genutzt werden. Mithilfe des Kernmodells wird die Grundlage zur Erfüllung der Zielsetzung dieser Dissertation geschaffen und die Basis für die Erweiterungen durch die Partialmodelle erzeugt. Innerhalb des Kernmodells PCF wird zunächst eine Übersicht über die abstrahierten und formalisierten Informationen durch ein UML-Klassendiagramm gegeben, welches in Abbildung 4-4 zu sehen ist. Dort werden die benötigten Informationen als Klassen repräsentiert, welche Attribute und Methoden besitzen. Nach der Beschreibung der Attribute der einzelnen Klassen werden die Methoden detailliert durch UML-Aktivitätsdiagramme aufgeführt.

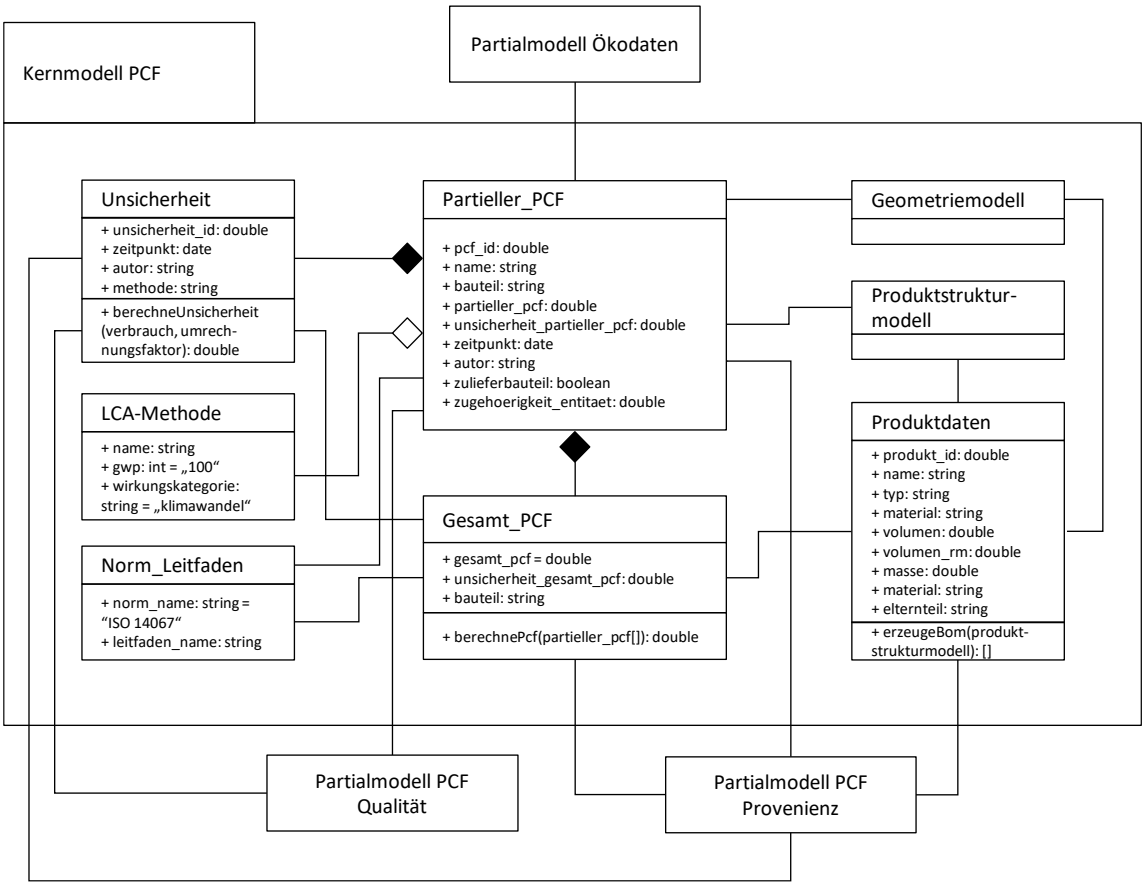


Abbildung 4-4: Kernmodell PCF des Informationsmodells zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling als UML-Klassendiagramm

Die Klasse Partieller_PCF ist das zentrale Element des Informationsmodells. Sie besitzt die Attribute *pcf_id, name*, *bauteil, partieller_pcf*, *unsicherheit_partieller_pcf, zeitpunkt*, *autor*, *zulieferbauteil* und *zugehoerigkeit_entitaet*. Der Zahlenwert des pPCF ergibt sich als Quotient aus Verbrauch sowie Umrechnungsfaktor und wird mit einem Identifikator *pcf_id* versehen. Die Unsicherheit des pPCF wird im Attribut *unsicherheit_partieller_pcf* gespeichert und wird für die anschließende Berechnung der gesamten Unsicherheit benötigt. Die beiden Attribute *zeitpunkt* und *autor* dienen zur Informationserweiterung über den Ursprung der Berechnung. Der Zeitpunkt der Bestimmung des PCF ist ein wichtiger Hinweis, ob die Berechnung Aktualität aufweist. Im Attribut *zulieferbauteil* wird angegeben, ob es sich um eine Zulieferung handelt. Dies kann für die Verantwortlichkeit der Berechnung von Bedeutung sein. Im letzten Attribut *zugehoerigkeit_entitaet* wird der pPCF einer Entität der STEP-Datei zugeordnet. Die Zuordnung erfolgt durch den eindeutigen Hash der Entität in der STEP-Datei. Die Klasse Partieller_PCF besitzt eine assoziative Verbindung zu den Partialmodellen Ökodaten, PCF Qualität und PCF Provenienz, da die pPCF dort Anwendung finden. Die weiteren Klassen des Kernmodells sind über unterschiedliche Beziehungen mit der Klasse Partieller_PCF verbunden.

Alle Zahlenwerte der pPCF werden in der Klasse Gesamt_PCF durch die Methode *berechnePcf* addiert und in dem Attribut *gesamt_pcf* gespeichert. Die Unsicherheitsermittlung wird durch eine eigene Klasse durchgeführt, da diese komplexer ist und als eine zusätzliche Information verstanden wird. Als drittes Attribut wird der Gesamt PCF mit einem *bauteil* in Verbindung gebracht. Die Kompositionsbeziehung zwischen den beiden Klassen zeigt eine Teile-Ganze-Beziehung: Die Klasse Gesamt_PCF ist ein existenzabhängiger Teil der Klasse Partieller_PCF und kann ohne diese nicht existieren.

Die Klasse Unsicherheit erweitert die Klassen Gesamt_PCF sowie Partieller_PCF und ist existenzabhängig. Sie besitzt die Attribute *unsicherheit_id*, *zeitpunkt*, *autor* und *methode* sowie die Methode *berechneUnsicherheit*. Durch Anwenden der Methode wird die Unsicherheit je nach Wahl der Berechnungsmethode, welche nachfolgend detailliert erläutert wird, berechnet. Zur Berechnung der Unsicherheit wird analog zur Berechnung des PCF der Input *verbrauch* und *umrechnungsfaktor* bzw. die Unsicherheit der pPCF benötigt. Die Berechnung wird um Informationen zum Zeitpunkt und zum Autor erweitert. Die Unsicherheitsberechnung kann zu einem nachgelagerten Zeitpunkt im Vergleich zur PCF Berechnung erfolgen. Auch die Autoren können unterschiedlich sein.

Weiterhin existiert die Klasse LCA-Methode, die eine Aggregation zum pPCF besitzt. Im Gegensatz zur Komposition wird durch die Aggregation eine Teile-Ganzes-Beziehung ausgedrückt, die nicht existenzabhängig ist. Innerhalb der Klasse wird durch das Attribut *name*, die Bezeichnung der LCA Methode beschrieben, wie beispielsweise „IPCC 2013“ oder „ReCiPe Midpoint“, die der Berechnung des PCF zugrunde liegt. Die einzelnen LCA-Methoden besitzen verschiedene Berechnungslogiken und -matrizen und erzeugen demensprechend unterschiedliche Endwerte des PCF. Auch das GWP wird in der Klasse LCA-Methode durch das Attribut *gwp* durch eine numerische Anzahl an Jahren definiert. Dieses besitzt den Standardwert 100 Jahre, der laut EGGLESTON ET AL. empfohlen wird [132]. Das dritte Attribut lautet *wirkungskategorie* und wird ebenfalls mit einem Standardwert beschrieben: „klimawandel“. Die Wirkungskategorie wird bei der Durchführung der Berechnung des PCF von einigen Methoden benutzt und grenzt das Ergebnis ein. Bei „klimawandel“ besteht das Ergebnis aus CO_2-Äquivalenten, welches dem Ergebnis eines PCF entspricht. Die Wirkungskategorie als Attribut wird an dieser Stelle eingeführt, damit das Konzept dieser Dissertation auf andere Kennwerte wie beispielsweise den Wasserfußabdruck von Produkten übertragbar ist. Je nach Wahl der Wirkungskategorie kann eine definierte Kennzahl zur ökologischen Auswirkung des Produkts berechnet werden. So ist es auch denkbar, dass der PCF mit anderen Kennzahlen erweitert werden kann. Eine Möglichkeit ist die Berechnung weiterer Kennzahlen und die Über-

prüfung von definierbaren Grenzwerten. Innerhalb dieser Dissertation wird sich allerdings auf die Kennzahl PCF als Ergebnis der Wirkungskategorie „klimawandel“ beschränkt.

Die Klasse Norm_Leitfaden beschreibt die Informationen, die bei der Berechnung des PCF als Rahmenbedingungen genutzt werden. Das erste Attribut lautet *norm_name* und ist mit dem Standardwert „ISO 14067“ definiert, welche die aktuelle ISO-Norm für den CO_2-Fußabdruck von Produkten beschreibt [104]. Das zweite Attribut ist *leitfaden_name* und kann optional mit einem genutzten Leitfaden bei der PCF Berechnung ergänzt werden. Ein Beispiel hierfür ist der VDMA Leitfaden zur Berechnung des PCF im Maschinen- und Anlagenbau [139]. Eine Übersicht der Normen und Leitfäden, die zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Dissertation existieren, gibt Tabelle 2-1 im Kapitel 2.2.5. Die Klasse Norm_Leitfaden ist durch eine Assoziation mit der Klassen Gesamt_PCF und Partieller_PCF verbunden.

Eine weitere Klasse bilden die Produktdaten. Die Klasse besitzt die Attribute *produkt_id*, welche eine eindeutige Identifikation des Produkts kennzeichnet, und *name.* Die Attribute *material* und *masse* dienen zur Ableitung von Informationen zum Ressourcenverbrauch. So können über die Angabe des Materials und der Masse Rückschlüsse auf das genutzte Rohmaterial getroffen werden. Es ist in den einzelnen Fertigungsverfahren zu überprüfen, ob das *volumen* des Bauteils mit dem benötigten Rohmaterial übereinstimmt. Bei additiven Fertigungsverfahren wie Fused Filament Fabrication (FFF) entspricht das Volumen des Bauteils dem verbrauchten Rohmaterial, wenn keine Stützstrukturen verwendet werden und wenn keine Nachbearbeitung durch Drehen, Fräsen oder Bohren vorgesehen ist. Werden Stützstrukturen verwendet oder weicht das Volumen der Endgeometrie des Bauteils ab, ist das Volumen des Rohmaterials unter dem Attribut *volumen_rm* anzugeben. Bei subtraktiven Fertigungsverfahren wie dem Fräsen ist das verbrauchte Rohmaterial stets größer als das Bauteilvolumen und entsprechend unter diesem Attribut anzugeben. Das letzte Attribut lautet *elternteil* und wird in Baugruppenstrukturen genutzt, um die Hierarchie der Bauteile anzuzeigen. Die Klasse Produktdaten besitzt die Methode *erzeugeBom*, die das Produktstrukturmodell als Input nutzt. Durch die Methode kann eine Baugruppe als Stückliste (Bill of Material – BOM) ausgegeben werden.

Als weitere Klassen sind das Produktstrukturmodell und das Geometriemodell im Kernmodell integriert. Das Produktstrukturmodell wird in der zuvor beschriebenen Methode benötigt. Das Geometriemodell ist die 3D-Repräsentation des Produkts und kann durch unterschiedliche Formate dargestellt werden. Als ein universell einsetzbares und stan-

dardisierte Dateiformat wird in dieser Dissertation STEP genutzt, da es sowohl das Produktstrukturmodell als auch das Geometriemodell beinhaltet. Über die Repräsentation mit STEP sind Informationen zu den zuvor beschriebenen Attributen *volumen* und *material* der Klasse Produktdaten direkt auslesbar. Aktuelle Bestrebungen der STEP-Normierung sehen eine Angabe von zusätzlichem Volumen wie einem Stützstrukturvolumen vor, aus dem das Attribut *volumen_rm* abgeleitet werden kann.

Im Kernmodell PCF werden zwei Methoden definiert: *berechnePCF* und *berechneUnsicherheit*. Diese werden folgend mit den Aktivitäten „PCF berechnen“ und „Unsicherheit berechnen“ erläutert.

PCF berechnen

Die Berechnung des PCF in der Produktentstehung ist eine zentrale Fragestellung dieser Dissertation. Ein systematisches Vorgehen zur Erreichung dieses Ziels zeigt das UML-Aktivitätsdiagramm in Abbildung 4-5.

Im ersten Schritt der Ermittlung des PCF wird das Ziel und der Untersuchungsrahmen dokumentiert. Dieser Schritt ist eine Voraussetzung nach der Norm des PCF (ISO 14067 [104]), welche auf dem systematischen Vorgehen der Norm der Ökobilanz (ISO 14044 [5]) aufbaut. Innerhalb dieses Schrittes ist die funktionelle Einheit zu benennen. Im vorliegenden Konzept bezieht sich die Bilanz auf ein Stück des produzierten Bauteils. Anschließend folgt die Aufstellung der Formeln zur Berechnung als Teil der Sachbilanz nach ISO 14044 [5]. Die zu Grunde liegende Formel des PCF wird beschrieben durch:

$$PCF = \sum_{i=1}^{n} V_i \cdot u_i \qquad 4\text{-}1$$

Wobei *i* die Anzahl der Ein- und Ausgangsgrößen der Sachbilanz, *V* die Verbrauchswerte der Ein- und Ausgangsgrößen und *u* den Umrechnungsfaktor der Ein- und Ausgangsgrößen darstellt.

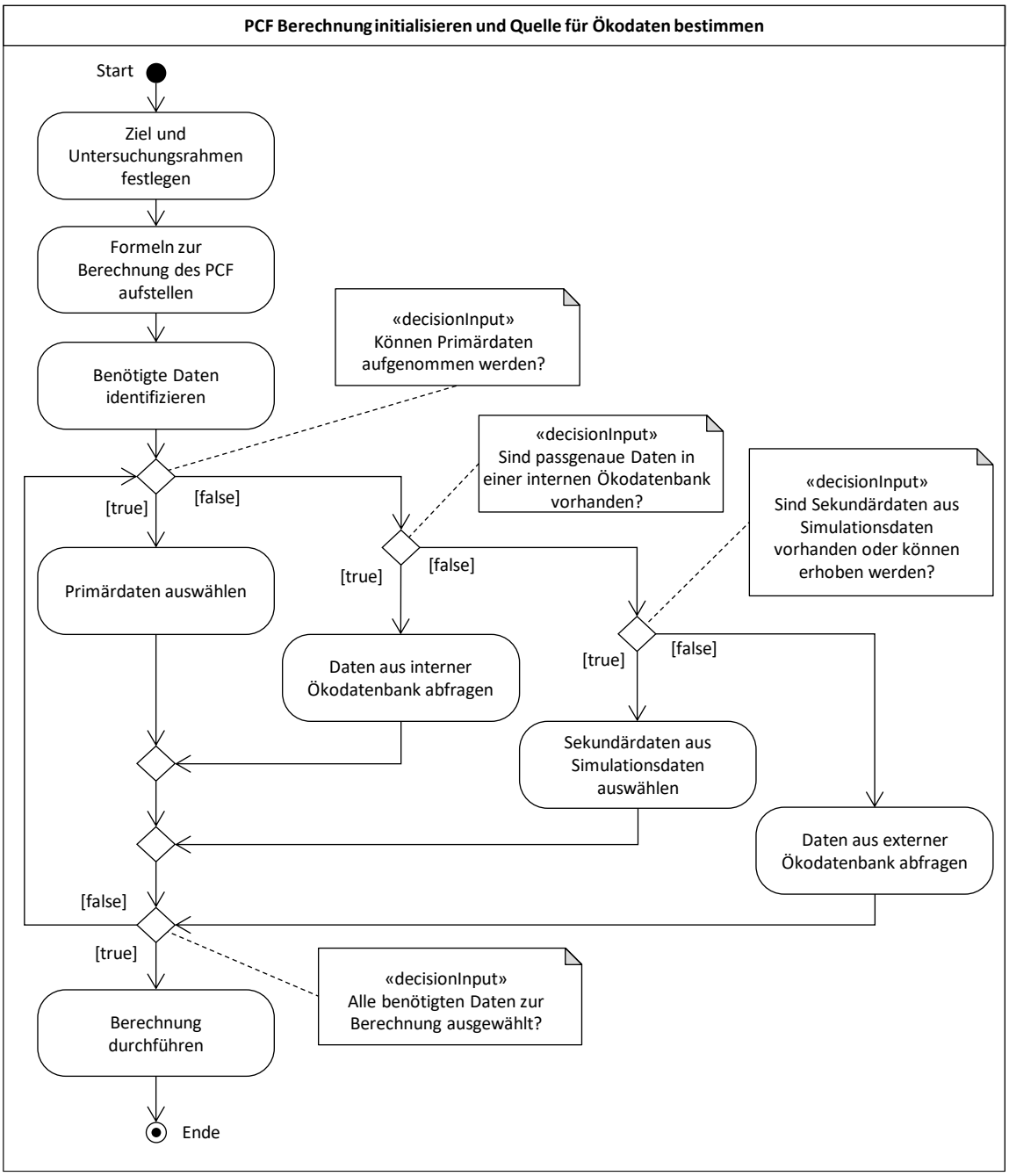


Abbildung 4-5: UML-Aktivitätsdiagramm „PCF Berechnung initialisieren und Quelle für Ökodaten bestimmen“ zur Ermittlung des PCF mit unterschiedlichen Datenquellen

Die einzelnen Summanden werden als pPCF bezeichnet und in der Klasse Partieller_PCF gespeichert. Der Umrechnungsfaktor kann positiv sowie negativ sein. Ist der Umrechnungsfaktor bereits als fester Wert vorhanden, müssen hier keine weiteren Formeln genutzt werden. Ist dieser nicht bekannt, wird eine externe Ökodatenbank zu Ermittlung genutzt. Dort sind Prozesse hinterlegt, die den Anwendungsfall annähern können wie beispielsweise die Nutzung von Strom mit einem definierten Strommix aus verschiedenen Erzeugungsquellen. Die Formeln der Verbrauchswerte ergeben sich durch die bereitgestellten Daten des Digitalen Masters oder Digitalen Zwillings. Der Digitale Zwilling

liefert hier beispielsweise Zeitreihendaten aus Messsensorik, die durch die individuellen Zeitstempel der Produktion des Produkts angepasst werden müssen. Je nach Datengrundlage müssen die Daten noch gefiltert und das Integral gebildet werden, um einen Verbrauchswert zu erlangen. Im zweiten Schritt werden die benötigten Daten identifiziert. Es müssen Zahlenwerte zu jedem Verbrauchswert V und jedem Umrechnungsfaktor u aus der Formel 4-1 ermittelt werden. Wie bereits erwähnt, ist der Umrechnungsfaktor aus einer Ökodatenbank oder aus externen Datenquellen zu beziehen. Die Verbrauchswerte können aus unterschiedlichen Datenquellen stammen. Je weiter ein Produkt in seiner Produktentstehung voranschreitet, desto mehr Primärdaten oder Sekundärdaten aus Simulationsdaten können erhoben werden. Es können mehrere Verbrauchsdatenquellen vorhanden sein, beispielsweise existiert eine erste Abschätzung des Verbrauchs durch das CAD-Modell oder durch eine CAM-Simulation der Fertigung. Die zu verwendenden Verbrauchsdaten werden über eine kaskadierende Entscheidungslogik hierarchisch angeordnet. Primärdaten sind zu verwenden, wenn diese vorliegen. Existieren keine Primärdaten, muss überprüft werden, ob passgenaue Daten in einer internen Ökodatenbank vorliegen. Diese Daten werden beispielsweise aus einer PCF-Bilanz eines Vorgängerbauteils oder eines ähnlichen Bauteils aus Primärdaten generiert. Es ist darauf zu achten, dass die Übertragbarkeit in einem hohen Maße auf das vorliegende Bauteil gegeben ist. Die interne Datenbank dient darüber hinaus dazu, dass Bilanzen von Prozessen aus anderen Abteilungen oder Standorten gespeichert werden können. Sind keine Daten aus einer internen Ökodatenbank vorhanden, muss überprüft werden, ob Sekundärdaten aus Simulationsdaten vorliegen oder erhoben werden können. Die Grundlagen liefern zum Beispiel CAM-Programme, die zur Fertigung des Produkts auf spezifischen Produktionsmaschinen des Unternehmens erzeugt werden. Sind auch diese nicht vorhanden oder erzeugbar, müssen externe Ökodatenbanken bzw. externe Quellen verwendet werden.

Die Entscheidung über die Datenverfügbarkeit der Verbrauchsdaten muss für jede Ein- und Ausgangsgröße der Sachbilanz getroffen werden. Daher erfolgt eine Überprüfung, ob weitere Daten zur Berechnung benötigt werden. Sind die benötigten Daten vorhanden, dann kann die Berechnung des PCF durchgeführt werden. Nach der Berechnung des PCF wird diese um eine Berechnung der Unsicherheit ergänzt, die im Folgenden beschrieben wird.

Unsicherheit berechnen

Im Kernmodell PCF wird ein systematisches Vorgehen der Unsicherheitsberechnung als weitere Aktivität präsentiert, welche in Abbildung 4-6 zu sehen ist.

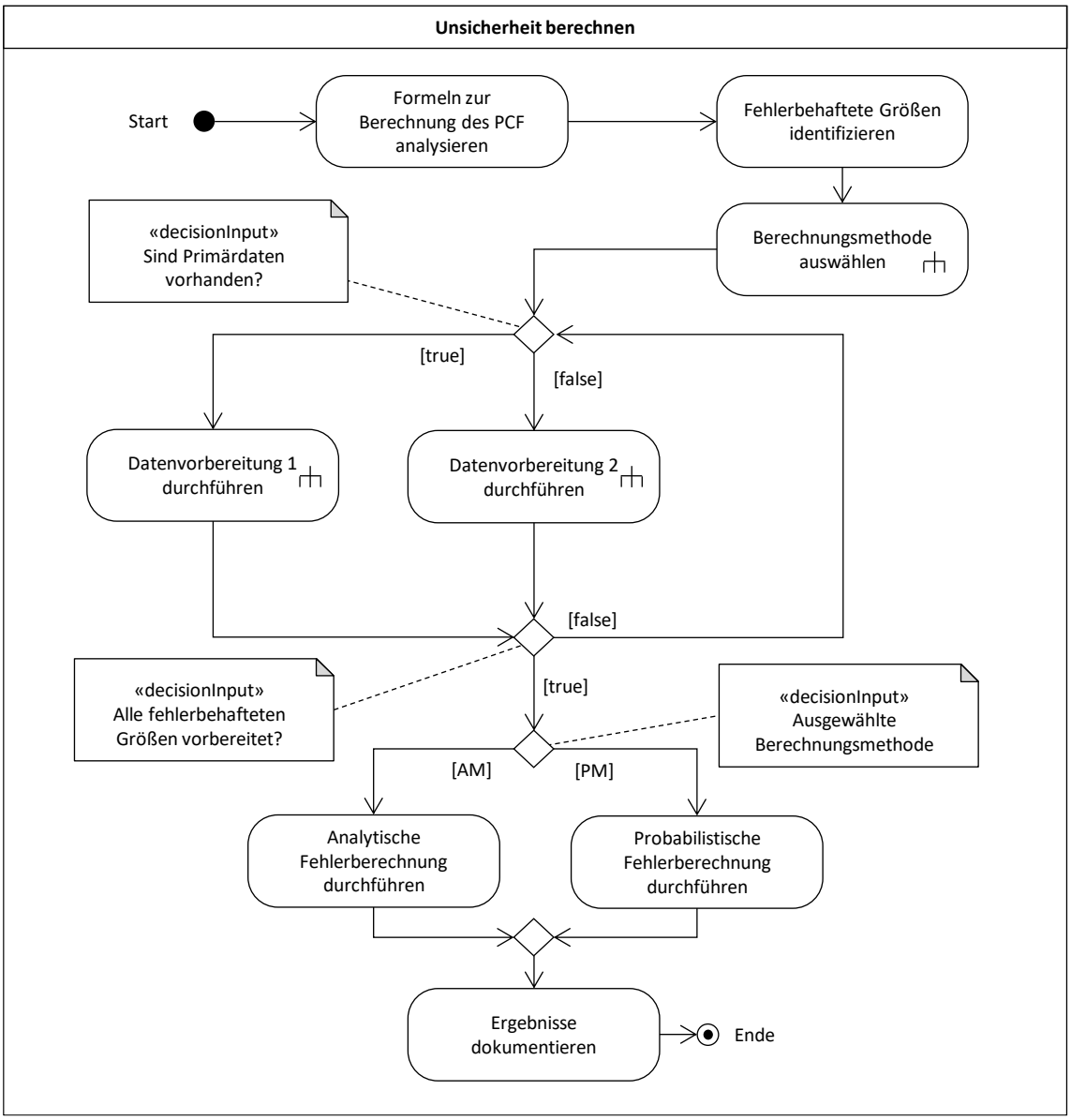


Abbildung 4-6: Durchführung der Unsicherheitsberechnung des PCF

Die Voraussetzung der Unsicherheitsberechnung ist das Vorliegen der Formel zur Berechnung des PCF. Diese wird im ersten Schritt analysiert, indem die einzelnen Größen aufgespaltet und auf einen potenziellen Einfluss auf die Unsicherheit untersucht werden. Die fehlerbehafteten Größen werden im Anschluss identifiziert und in Operanden aufgeteilt, die sich jeweils aus einem Fehler des Verbrauchswerts *V* und Fehler des Umrechnungsfaktors *u* zusammensetzen (siehe Formel 4-1). Nun ist die Berechnungsmethode zu wählen, nach der die Unsicherheit ermittelt wird. Diese wird nachfolgend genauer erläutert. In der Regel setzt sich die PCF-Bilanz aus mehreren Operanden zusammen, die einen unterschiedlichen Datenursprung haben. Primärdaten, die direkt aus einer Messsensorik entspringen, müssen in der Unsicherheitsberechnung anders behandelt werden als Sekundärdaten. Es folgt daher eine Unterscheidung, ob sich die Verbrauchswerte aus Primärdaten zusammensetzen. Ist dies der Fall, wird die Subaktivität

„Datenvorbereitung 1 durchführen“ gestartet, die im Anschluss erläutert wird. Andernfalls wird die Subaktivität „Datenvorbereitung 2 durchführen“ ausgeführt, in der die Berechnung von Verbrauchsdaten mittels Sekundärdaten erläutert wird. Das Ergebnis der Subaktivitäten sind vorbereitete Datensätze, die am Ende zu einem finalen Unsicherheitswert zusammengefasst werden. Diese Zusammenfassung folgt je nach Auswahl der Berechnungsmethode nach Formel 2-2 (analytische Methode) oder durch die Anwendung einer MCS (probabilistische Methode). Die fehlerhaften Größen müssen als vorbereitete Datensätze vorliegen. Daher wird eine Iteration der Subaktivitäten durchgeführt bis jeder Datensatz vorbereitet ist. Je nach der zuvor ausgewählten Berechnungsmethode wird die Fehlerrechnung mittels analytischer oder probabilistischer Methode ausgeführt. Das Ergebnis der Berechnung ist zu dokumentieren, welches den letzten Schritt der Unsicherheitsberechnung beschreibt.

Berechnungsmethode auswählen

Zur Berechnung der Unsicherheit im Kontext der Ermittlung von CO_2-Äquivalenten haben sich zwei Methoden etabliert: Die analytische Methode (AM) und die probabilistische Methode (PM). Ein Implementierungsbeispiel einer Unsicherheitsberechnung durch die AM ist die Gaußschen Fehlerfortpflanzung (FFP) mit der Formel 2-2, deren Ergebnis die Gesamtunsicherheit als Summe der Einzelunsicherheiten ist [237]. Bei der PM findet die MCS Anwendung, welche deutlich mehr Informationen liefert als die FFP, wie beispielsweise eine statistische Verteilung der Unsicherheit. Beide Implementierungsbeispiele zur Veranschaulichung der Methoden sind im Kapitel 2.3.2 vorgestellt worden. In der Durchführung der Aktivität „Unsicherheit berechnen“ ist die Auswahl zwischen den beiden Methoden zu treffen. Sie besitzen unterschiedliche Vorgehensweisen, können aber ein identisches Ergebnis liefern, wenn die Bedingungen für die Anwendbarkeit erfüllt sind, wie eine relativ geringe Unsicherheit und keine Korrelation zwischen den Quellen [238]. Die Wahl der Methode hängt von den vorhandenen Eingangsdaten und dem Ziel der Unsicherheitsberechnung ab. Ein Kriterium der AM ist die Normalverteilung der Eingangsdaten. Als Beispiel eines Ergebnisses kann die Unsicherheit nach der AM bei einem 95-Prozent-Konfidenzintervall ±10 % betragen. Wenn die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion asymmetrisch ist, müssen die obere und untere Grenze des Konfidenzintervalls getrennt angegeben werden (z. B. –5 % und +10 %). In diesem Fall liefert die AM nur eine grobe Annäherung. Das asymmetrische Intervall muss, um verwendet werden zu können, durch ein symmetrisches Intervall ersetzt werden, welches unter Verwendung der größeren der beiden Werte gebildet wird (z. B. ±10 %). Wenn die Größen die benötigten Bedingungen nicht erfüllen, unterscheiden sich die Werte der beiden Methoden wie die folgenden Beispiele zeigen:

In der Anwendung der PM auf die Unsicherheitsberechnung der britischen THG des Jahres 2003 zeigt sich eine Unsicherheit von ±14 % [239]. Im Gegensatz dazu wurde bei der Anwendung der AM ein Wert von ±17 % ermittelt. Ein Grund hierfür kann die asymmetrische Verteilung im 95-Prozent-Konfidenzintervall einzelner Werte sein, welche bei der Anwendung der AM automatisch in symmetrische Intervalle umgewandelt werden. Das zweite Beispiel für ein unterschiedliches Ergebnis zeigt die Ermittlung der THG von Finnland im Jahr 2003 [238]: Die Unsicherheitsberechnung nach der PM erzeugt die Werte –14 % und +15 %. Nach Anwendung der AM wird der Wert ±16 % berechnet. Auch hier ist eine Fehlerquelle in der Asymmetrie zu finden. Die AM kann aufgrund der Vereinfachungen in der Berechnung nicht mit Asymmetrie umgehen. Um die Wahl der Methode zu treffen, sind zunächst die Bedingungen der Methoden zu überprüfen. Für die AM in der einfachsten Form gilt:

- Mittelwert und Standardabweichung müssen berechenbar sein.
- Die Inputs müssen unkorreliert (statistisch unabhängig) sein.
- Die Wahrscheinlichkeitsverteilung muss normalverteilt sein.
- Der Quotient aus dem Dividend Standardabweichung und dem Divisor Mittelwert muss kleiner als 0,3 sein.

Für den Umgang mit höheren Unsicherheiten, asymmetrischer Verteilung oder korrelierten Quellen siehe [238, 240]. Für die PM gilt:

- Die Präzision der Methode steigt mit der Anzahl der Iterationen.
- Die Unsicherheit der Inputs muss als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen vorliegen.

Generell gibt es Ansätze, wie die PM in die AM und vice versa überführt werden kann. Dies geschieht beispielsweise durch die Annahme einer Symmetrie trotz Asymmetrie oder das künstliche Erzeugen der Wahrscheinlichkeitsverteilung durch zufällig generierte Werte zu einer Normalverteilung. Somit ist auch eine hybride Nutzung der Methoden denkbar. Des Weiteren kann es im Sinne eines Qualitätsmanagements nützlich sein, beide Methoden durchzuführen, um die Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Die Implementierung der AM bedeutet nur einen geringen Mehraufwand, wenn die PM bereits vorhanden ist [238]. Wenn beide Methoden genutzt werden, sind die Ergebnisse der AM bei der Berichterstattung vorzuziehen [238].

Ein Vorgehen zur Auswahl der Methode gibt PACIORNIK ET AL. [241], welches in Abbildung 4-7 veranschaulicht wird. Wenn die Bedingungen und Ressourcen für die PM erfüllt sind, ist diese durchzuführen. Im Anschluss soll zusätzlich eine Berechnung nach der AM durchgeführt werden, wenn die Bedingungen an die AM erfüllt sind. Falls die

Bedingungen weder für die AM noch für die PM erfüllt sind, ist ein hybrider Ansatz zu wählen. Ist dieser ebenfalls nicht anwendbar, kann die AM mit Einschränkungen verwendet werden, um dennoch ein Ergebnis der Unsicherheit zu erhalten.

HEIJUNGS UND LENZEN merkt zudem an, dass die benötigte Rechenleistung einer MCS (Umsetzung der PM) deutlich über der FFP (Umsetzung der AM) liegt. Bei kleinen Systemen mit wenigen Einzelprozessen ist dieser Unterschied unbedeutend – er steigt aber bei größeren Systemen und kann dann Stunden oder sogar Tage bedeuten [242].

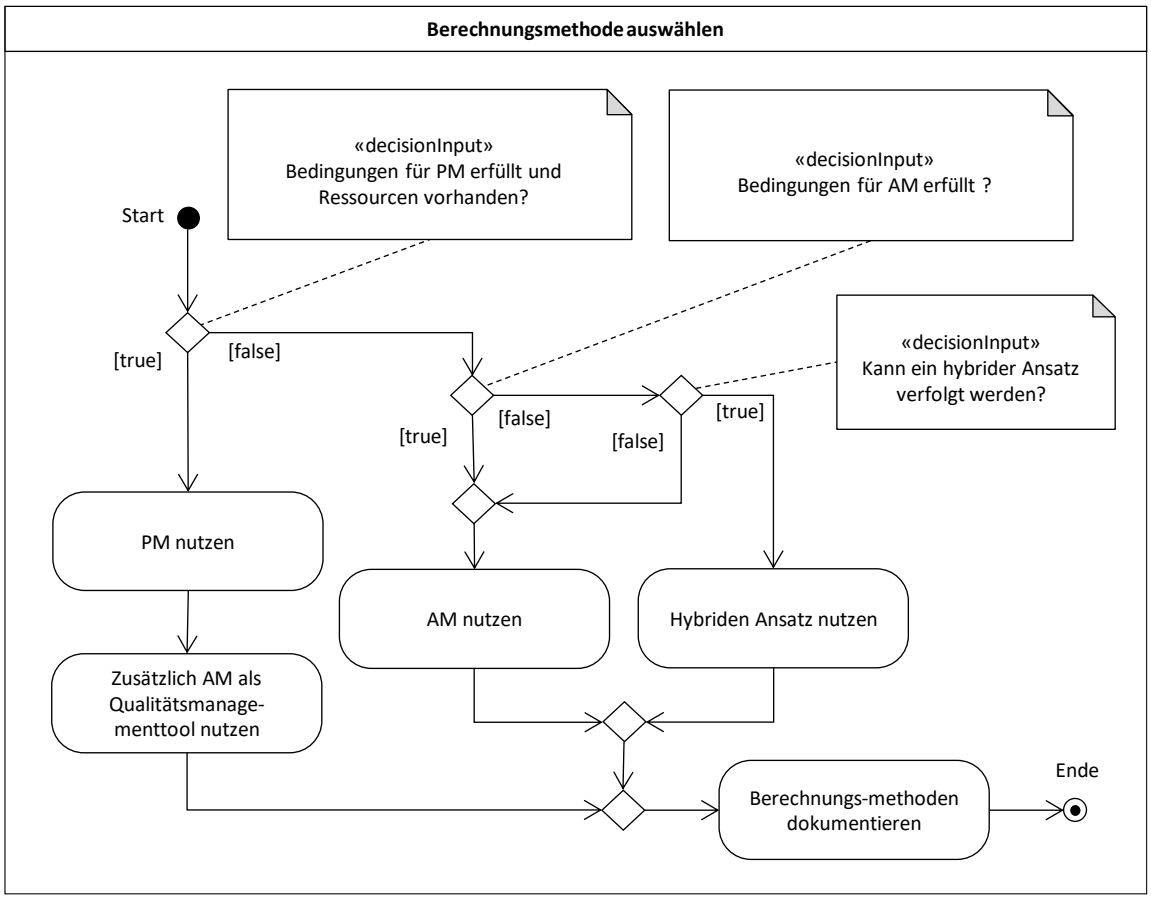


Abbildung 4-7: Auswahl der Berechnungsmethode zur Unsicherheitsbestimmung des PCF in Anlehnung an [241]

Datenvorbereitung 1 durchführen

Die Subaktivität „Datenvorbereitung 1 durchführen“ wird ausgeführt, wenn es sich um Primärdaten zur Verbrauchsberechnung handelt. Die Subaktivität ist in Abbildung 4-8 visualisiert. Es wird dort zwischen den Organisationseinheiten „Verbrauchsdaten (Primärdaten)“ und „Umrechnungsfaktor“ unterschieden, die zusammen den zu untersuchenden Operanden bilden.

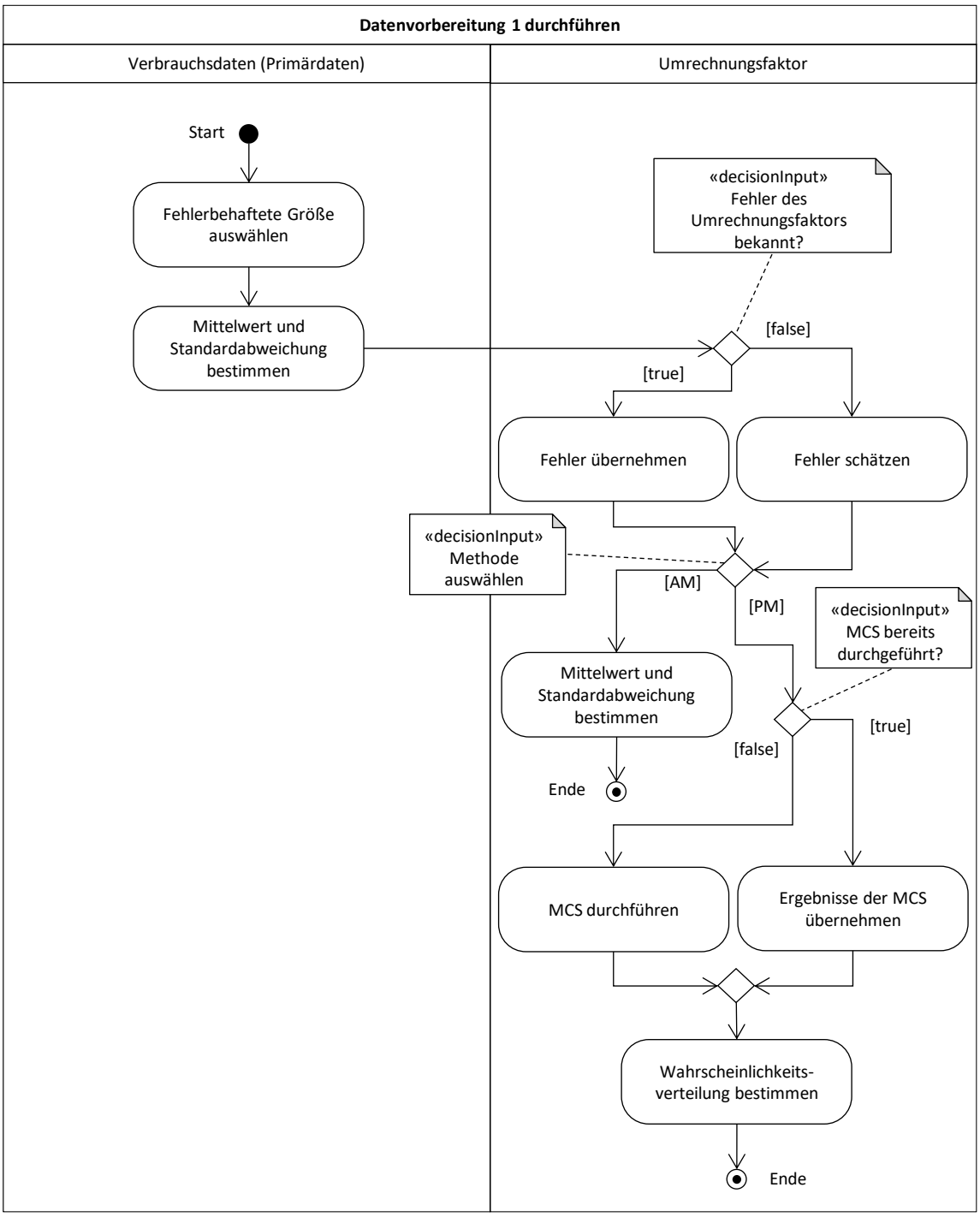


Abbildung 4-8: Durchführung der Datenvorbereitung 1 des PCF aufgeteilt in die Organisationseinheiten Verbrauchsdaten (Primärdaten) und Umrechnungsfaktor

Als erster Schritt in der Unsicherheitsberechnung eines Operanden mit einem Anteil an Primärdaten wird die fehlerbehaftete Größe ausgewählt. Bei Primärdaten handelt es sich um Messreihen, welche sich zum Beispiel aus Datenpunkten einer Messsensorik zusammensetzen. Die Datenpunkte liefern eine Ausgangslage zur Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung des Verbrauchswerts. Primärdaten können weiterhin einzelne Messpunkte sein wie beispielsweise eine Gewichtsmessung. Hier kann der

Fehler aus dem Datenblatt der Sensorik oder durch mehrfache Messung ermittelt werden. Nach der Bestimmung des Mittelwerts und der Standardabweichung des Verbrauchswerts wird der Umrechnungsfaktor vorbereitet. Ist der Fehler bekannt, kann er direkt übernommen werden. Ist der Fehler nicht bekannt, muss dieser geschätzt werden oder aus anderen Quellen bezogen werden. Zur Berechnung der Unsicherheit muss eine quantitative Aussage über den Fehler vorliegen.

Um den Umrechnungsfaktor zu bestimmen, wird in der Regel ein Literaturwert oder eine Ökodatenbank benutzt. Bei der Auswahl des Umrechnungsfaktors ist entsprechend darauf zu achten, dass eine quantitative Aussage über die Unsicherheit vorliegt. Aufgrund der ausgewählten Methode aus der Subaktivität „Berechnungsmethode auswählen“, werden die Daten des Umrechnungsfaktors unterschiedlich vorbereitet. Bei der Wahl der AM erfolgt die Bestimmung des Mittelwerts und der Standardabweichung. Wird die PM gewählt, muss zunächst untersucht werden, ob bereits eine MCS durchgeführt wurde. Softwaretools zur Bestimmung von Umrechnungsfaktoren, die eine Ökodatenbank integriert haben, besitzen eine Implementierung der MCS zur Unsicherheitsberechnung. Ist die MCS als Datensatz vorhanden, kann diese übernommen werden. Ist dies nicht der Fall, muss eine MCS nachträglich durchgeführt werden. Anschließend ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung zu bestimmen und das Ergebnis zu übergeben.

Datenvorbereitung 2 durchführen

Handelt es sich nicht um Primärdaten, sondern um Sekundärdaten, erfolgt die Datenvorbereitung nach Abbildung 4-9. Auch hier ist der Operand in zwei Organisationseinheiten analog zur Behandlung von Operanden mit Primärdaten aufgeteilt: Verbrauchsdaten (Sekundärdaten) und Umrechnungsfaktor. Im Unterschied zur Datenvorbereitung von Verbrauchsdaten mit Primärdaten ist das Vorgehen mit Sekundärdaten komplexer. Zunächst werden die Verbrauchsdaten vorbereitet. Nach der Auswahl der fehlerbehafteten Größe wird ermittelt, ob der Fehler des Verbrauchswertes bekannt ist. Dieser kann übernommen werden oder muss geschätzt bzw. aus anderen Quellen bezogen werden. Im Fall von Sekundärdaten aus Simulationen ist beispielsweise die Auflösung ein Anhaltspunkt zur Ermittlung der Unsicherheit.

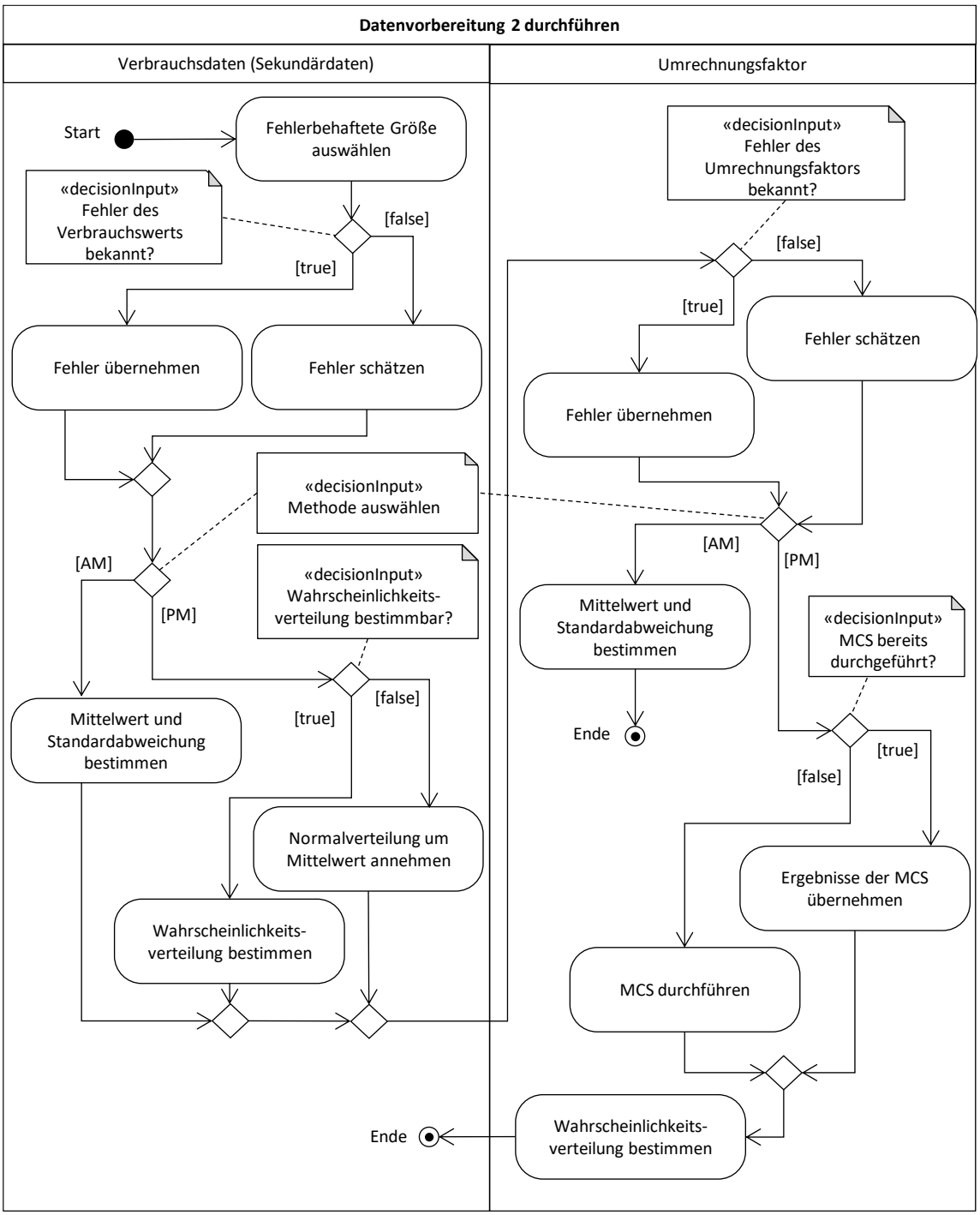


Abbildung 4-9: Durchführung der Datenvorbereitung 2 des PCF aufgeteilt in die Organisationseinheiten Verbrauchsdaten (Sekundärdaten) und Umrechnungsfaktor

Je nach Wahl der Berechnungsmethode wird im Anschluss bei Wahl der AM der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt. Bei der PM ist zu ermitteln, ob eine Wahrscheinlichkeitsverteilung bestimmbar ist. Ist dies nicht der Fall, wird eine Normalverteilung um den Mittelwert angenommen. Die Erzeugung einer Verteilung ist eine Voraussetzung, um die Daten zur Berechnung einer PM vorzubereiten. Im zweiten Teil werden

die Daten des Umrechnungsfaktors untersucht. Das Vorgehen hierzu ist analog zur Vorbereitung der Daten mit Primäranteil in der Subaktivität „Unsicherheitsberechnung 1 durchführen“.

4.4.3 Partialmodell Ökodaten

Das Partialmodell Ökodaten stellt Informationen und Methoden bereit, die als Datengrundlage der PCF Berechnung dienen. Im ersten Teil des Partialmodells werden die Elemente in Form eines UML-Klassendiagramms beschrieben. Nach der detaillierten Darstellung der Klassen mit Attributen und Methoden wird auf zwei Methoden genauer eingegangen. Die beiden Methoden beschreiben das Erlangen von Verbrauchsdaten durch Primärdaten oder Sekundärdaten aus Simulationsdaten. Das UML-Klassendiagramm zum Partialmodell Ökodaten ist in der Abbildung 4-10 veranschaulich:

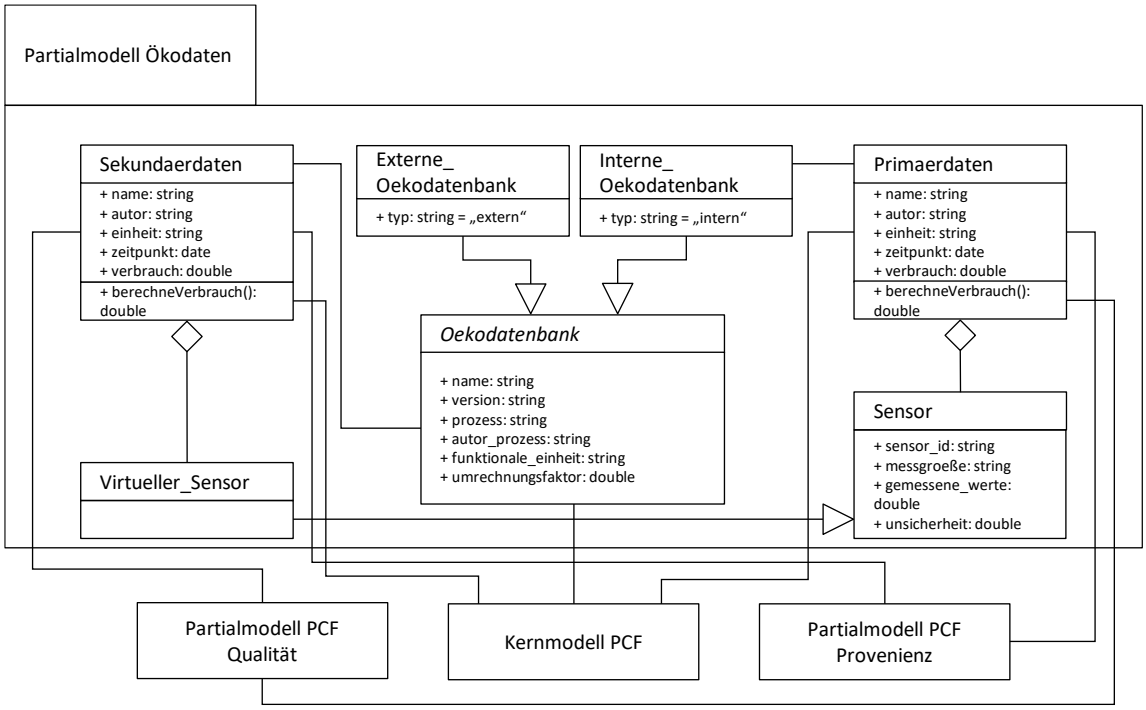


Abbildung 4-10: Partialmodell Ökodaten des Informationsmodells zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling als UML-Klassendiagramm

Die zentrale Klasse im Partialmodell lautet Oekodatenbank. Sie ist eine abstrakte Klasse (kursive Darstellung) und kann nur durch die Instanziierung in eine externe oder interne Ökodatenbank verwendet werden. Das Attribut *name* definiert die Ökodatenbank, wie beispielsweise „ecoinvent“, „GaBi“ oder „ProBas“. Externe Ökodatenbanken werden teilweise jährlich aktualisiert, daher ist es essenziell, die *version* anzugeben. Je nach Verwendung der Ökodatenbank werden unterschiedliche Prozesse genutzt, die im gleichnamigen Attribut *prozess* gespeichert werden. Ebenfalls sind der Autor des Prozesses

unter *autor_prozess* und die funktionelle Einheit unter *funktionale_einheit* festzuhalten. Außerdem ist in der Ökodatendank der *umrechnungsfaktor* definiert, der in der PCF Berechnung und in der Unsicherheitsberechnung verwendet wird. Die beiden Klassen Externe_Oekodatenbank und Interne_Oekodatenbank sind als Spezialisierungen der abstrakten Klasse Oekodatenbank dargestellt. Sie besitzen die Attribute und Beziehungen der abstrakten Klasse. Eine externe Ökodatenbank sollte nicht verändert werden und wird in der Regel eingekauft. Um individuelle Anpassungen oder eigene Einträge zu verfassen, wird die Klasse Interne_Oekodatenbank genutzt.

Die Klasse Primaerdaten dient zum Speichern der gemessenen Verbrauchsdaten eines Prozesses. Die Beschreibung der Primärdaten erfolgt anhand des Attributs *name*, *einheit* und *verbrauch*. Der verantwortliche *autor* der Primärdaten ist ebenfalls anzugeben. Beispiele für Primärdaten sind die Gewichtsmessung oder der Verbrauch von elektrischer Energie. Über die Methode *berechneVerbrauch* wird der Zahlenwert des Attributs *verbrauch* berechnet. Neben Assoziationen zur Klasse Interne_Oekodatenbank und dem Kernmodell PCF sowie den Partialmodellen PCF Qualität und PCF Provenienz besitzt die Klasse Primaerdaten eine Aggregation zur Klasse Sensor.

Mittels der Klasse Sensor wird die Messsensorik der Primärdaten genauer beschrieben. Ein Sensor besitzt eine *sensor_id* zur eindeutigen Identifikation und eine *messgroeße*, die die Einheit des Ausgabewerts der Messsensorik definiert. Die Messgröße ist beispielsweise bei der Gewichtsmessung „kg“ und bei der Messung der elektrischen Spannung „V“. Das Attribut *gemessene_werte* beinhaltet die Ausgabewerte des Sensors, welche darauffolgend weiterverarbeitet werden. So erfolgt beispielsweise bei einer Verbrauchsmessung über ein Zeitintervall eine Integration zum Erhalt des Endwertes. Das vierte Attribut definiert die *unsicherheit* des Sensors. Diese muss für eine spätere Untersuchung der Gesamtunsicherheit des PCF vorliegen.

Die Klasse Sekundaerdaten folgt einer ähnlichen Struktur wie die Klasse Primaerdaten. Sie besteht aus den Attributen *namen*, *autor*, *einheit* sowie *verbrauch* und kann den Zahlenwert des Attributs *verbrauch* durch die gleichnamige Methode *berechneVerbrauch* erhalten. Die Klasse Sekundaerdaten wird dazu genutzt, um den Verbrauch über Sekundärdaten aus Simulationsdaten zu erheben und zu speichern. Neben den Assoziationen besitzt sie eine Aggregation zur Klasse Virtueller_Sensor.

Durch eine Spezifikation der Klasse Sensor wird die Klasse Virtueller_Sensor erzeugt. Alle Attribute der generalisierten Klasse werden übernommen. Virtuelle Sensoren werden verwendet, um physikalische Größen zu schätzen, und werden zur Plausibilisierung, Überwachung, als Alternative zu realen Sensoren sowie zur Herstellung von Redundan-

zen eingesetzt [243]. Im vorliegenden Konzept werden virtuelle Sensoren für eine Schätzung von Verbrauchsgrößen in einer Simulation genutzt. Der virtuelle Sensor verhält sich analog zu einem physischen Sensor: Er besitzt eine Messgröße und Auflösung.

Der Erhalt der Messgrößen durch physische oder virtuelle Sensoren soll im Folgenden näher beleuchtet werden. Zunächst findet die Beschreibung für physische Sensoren statt, die Primärdaten für eine Verbrauchberechnung liefern, und im Anschluss virtuelle Sensoren, die Simulationsdaten für eine Verbrauchsberechnung liefern. Die Verbrauchsdaten werden zur Berechnung des PCF benötigt, wie es im Kernmodell PCF beschrieben wird.

Erhebung der Verbrauchsdaten durch Primärdaten

In der Sachbilanz des PCF werden die Ein- und Ausgangsgrößen definiert, die über die Systemgrenze fließen. Bei der Produktion ist ein Großteil der Ein- und Ausgangsflüsse auf die Verbrauchsdaten der Produktionsmaschinen zurückzuführen. Diese Verbräuche sind produktindividuell zu messen, um den PCF anschließend berechnen zu können. Die Verbrauchsdaten der Maschinen können automatisiert über einen Digitalen Schatten bezogen werden. Der Digitale Schatten gilt als Handlungsfeld der Industrie 4.0 und stellt ein Abbild der Prozesse in der Produktion dar, um eine Auswertebasis zu schaffen [244]. Von einem Digitalen Schatten ist die Rede, wenn die Daten vom physischen Zwilling an den Digitalen Zwilling übergeben werden [245]. Bei Produktionsmaschinen handelt es sich aller Regel nach um Cyber-physische Systeme (CPS), welche die Fähigkeit zum Erfassen und Verarbeiten von Daten besitzen und diese über Schnittstellen zur Verfügung stellen können. Diese Daten sind beispielsweise Material- und Energieverbräuche während der Produktion. Ein CPS besitzt zwei Systemelemente: Ein Monitoringsystem für die Verbrauchsdaten und ein Nachverfolgungssystem zum eindeutigen Identifizieren der Produkte während der Produktion [246]. Die Voraussetzung für das Monitoringsystem ist der Einbau von Sensorik an den Maschinen. Die Sensorik ist definiert als abgeschlossene Komponente in einem technischen System, welche an ihrem Eingang durch einen Messfühler mit der Messgröße in Verbindung steht und diese anschließend in ein

elektrisches Signal umformt [247]. In der Automatisierungstechnik können die benötigten Elemente für die Implementierung von Sensorik in Funktionselemente untergliedert werden, welche in Abbildung 4-11 zu sehen sind.

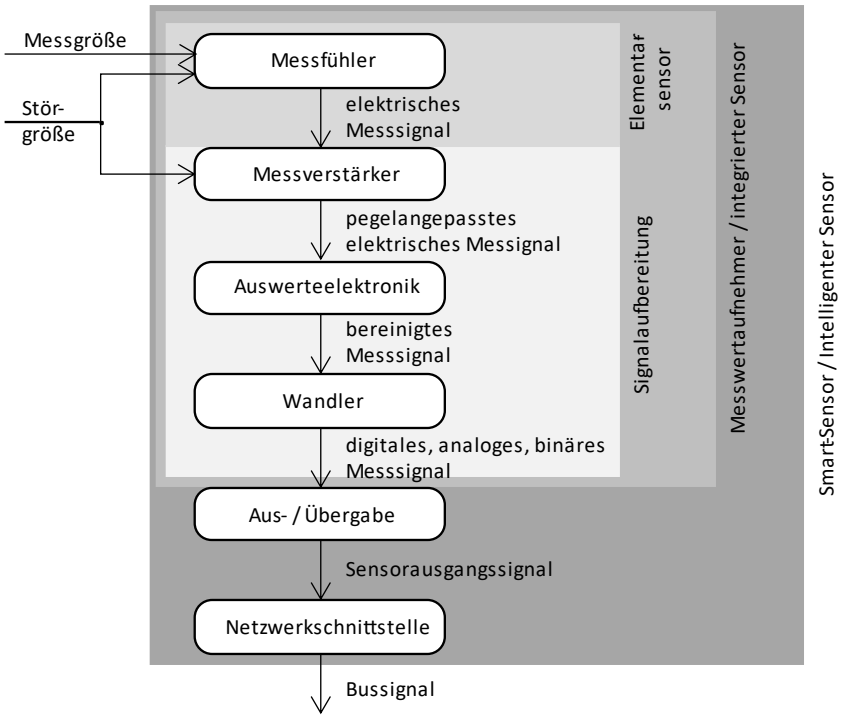


Abbildung 4-11: Funktionselemente einer Sensorik nach [247]

Die Messgröße wird von einem Messfühler aufgenommen, der ein elektrisches Messignal ausgibt und als Elementarsensor bezeichnet wird. Die Signalaufbereitung erfolgt durch einen Messverstärker, eine Auswerteelektronik und einen Wandler, der ein digitales, analoges oder binäres Messignal ausgibt. Zusammen bilden der Elementarsensor und die Signalaufbereitung den Messwertaufnehmer bzw. den integrierten Sensor. Es gilt zu beachten, dass Störgrößen den Messfühler und den Messverstärker beeinflussen können. Durch eine Erweiterung um eine Netzwerkschnittstelle wird ein Smart-Sensor bzw. ein intelligenter Sensor erzeugt, welcher ein Bussignal zur weiteren Verarbeitung im Digitalen Zwilling bereitstellt.

Erhebung der Verbrauchsdaten durch Sekundärdaten aus Simulationsdaten

Sekundärdaten aus Simulationsdaten dienen dazu, einen realen Verbrauchswert abzuschätzen. Dies gilt für statische oder dynamische Prozesse. In dieser Dissertation werden die Beispiele einer Simulation des Gewichts als statischer Prozess und eine Simulation eines Fertigungsprozesses als dynamischer Prozess beschrieben. Zur Simulation des Gewichts kann das Geometriemodell genutzt werden. Durch eine Analyse des Geometrie-

modells kann das Volumen ermittelt werden. Ist das Material bekannt, erfolgt eine Berechnung des Gewichts durch die Multiplikation zwischen Materialdichte und abgeleitetem Volumen.

Simulationen von Fertigungsprozessen lassen sich in verschiedene Stufen einteilen, angefangen von einem generischen Ansatz bis hin zu einer maschinenspezifischen Simulation. In der ersten Stufe werden Werkzeugpfade verifiziert, indem das Zusammenspiel von Werkzeug und Fertigungsobjekt simuliert wird. Liegt ein Geometriemodell der Werkzeugmaschine vor, kann in der zweiten Stufe eine kinematische Simulation der gesamten Maschine stattfinden, die ebenfalls aufgrund der Werkzeugpfade gesteuert wird. In dieser Stufe kann auch der G-Code genutzt werden, um die Simulation der gesamten Maschine durchzuführen. Durch das Einbetten der Steuerungssoftware einer Maschine, kann diese in der dritten Stufe simuliert werden. Die höchste Stufe ist die vierte Stufe, in der sowohl die Steuerungssoftware als auch die Benutzungsoberfläche der Maschine integriert sind und die Maschine als virtuelle Maschine abgebildet wird. Zur Erhebung der Verbrauchsdaten durch Sekundärdaten aus Simulationsdaten können die Stufen eins bis drei genutzt werden, je nachdem welche Informationen und Modelle über die physische Maschine vorliegen. Stufe vier erzeugt keinen Mehrwert an Informationen zum Verbrauch gegenüber Stufe drei und wird nicht weiter berücksichtigt. Die Auswahl der zu verwendeten Stufe eins bis drei ist in der Abbildung 4-12 zu sehen. Eine Verwendung der dritten Stufe (Maschinensimulation mit eigener Steuerung) ist anzustreben, da hier die maschinenspezifische Simulation den realen Fertigungsprozess detailgetreu wiedergibt. Kann die Steuerung nicht integriert werden, findet eine Simulation auf der zweiten Stufe statt. Das kinematische Modell der Maschine bildet die Bewegungen der Maschine ab. Ist kein kinematisches Modell vorhanden, muss die Simulation auf Stufe eins stattfinden. Ist die Auswahl über die Stufe der Simulation getroffen, kann die virtuelle Sensorik gestartet werden. Die virtuelle Sensorik ist ein parallel zur Simulation laufendes Programm, welches die ausgewählten Zustände der Simulation in einer vorher festgelegten Taktung protokolliert. Für eine Verbrauchsschätzung des Fertigungsprozesses sind im ersten Schritt die Ein- und Ausgangsgrößen der Maschine zu analysieren und je ein virtueller Sensor zu implementieren. Eine Inputgröße, die bei den meisten Maschinen zu finden ist, ist die elektrische Energie. Um diese mittels virtueller Sensorik zu erhalten, müssen die Bewegungen der Maschine überwacht werden. Üblicherweise sind die Bewegungsarten der Maschine einem unterschiedlichen Energieverbrauch zuzuordnen. Bei einer spanabhebenden CNC-Maschine ist zum Beispiel die Freilaufbewegung weniger energieintensiv als eine Bearbeitung mit Materialabtrag. Die unterschiedlichen Bewegungsarten sind festzuhalten. Anschließend kann mit einem Um-

rechnungsfaktor der Bewegungsarten der Gesamtenergieverbrauch der Maschine berechnet werden. Die weiteren Ein- und Ausgangsgrößen sind analog zu behandeln. So kann beispielsweise das Ein- und Ausschalten einer Kühlmittelpumpe protokolliert werden, wenn diese ein Bestandteil der Simulation ist.

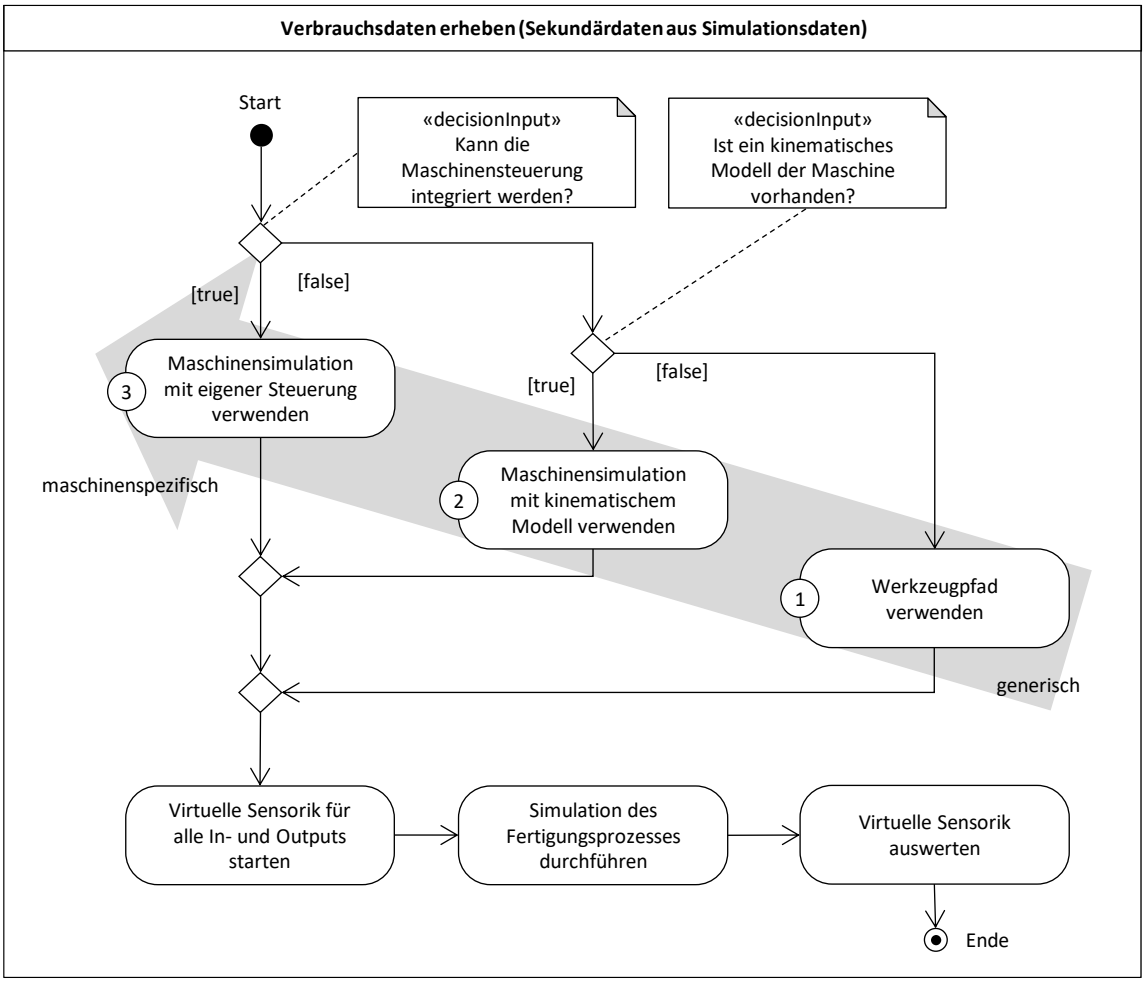


Abbildung 4-12: Erhebung der Verbrauchsdaten von Sekundärdaten aus Simulationsdaten eines Fertigungsprozesses

4.4.4 Partialmodell PCF Qualität

Das Partialmodell PCF Qualität erweitert das Kernmodell PCF um Informationen zur Qualität des errechneten Kennwerts. Der Begriff Qualität ist zurückzuführen auf das lateinische Wort „qualitas“, welches mit „Beschaffenheit“ oder „Eigenschaft“ übersetzt werden kann. Qualität kann auf zwei Arten und Weisen verwendet werden: als neutrale Summe von Eigenschaften bzw. der Beschaffenheit oder durch eine Beschreibung bewertet als Güte von Eigenschaften [248]. In dieser Dissertation findet letztere Anwendung, indem die Berechnung des PCF auf Güte einzelner Eigenschaften untersucht wird. Darüber hinaus ist Qualität in der ISO 9000 definiert als Grad, in dem ein Satz inhärenter

Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt [145]. Inhärent bedeutet in diesem Kontext eine innere, messbare Eigenschaft eines Objekts im Gegensatz zu einer Eigenschaft, die zugeschrieben wird. Das Objekt ist in diesem Fall die durchgeführte Berechnung des PCF. Die inhärenten Merkmale sind Attribute, die im Folgenden beschrieben werden. Die Attribute sind im UML-Klassendiagramm in Abbildung 4-13 des Partialmodells in den Klassen Datenqualitaet, Aussagekraft, Datenanteile und Maßnahme zu sehen. Über Assoziationen bestehen Verbindungen zum Kernmodell PCF, dem Partialmodell PCF Provenienz und dem Partialmodell Ökodaten.

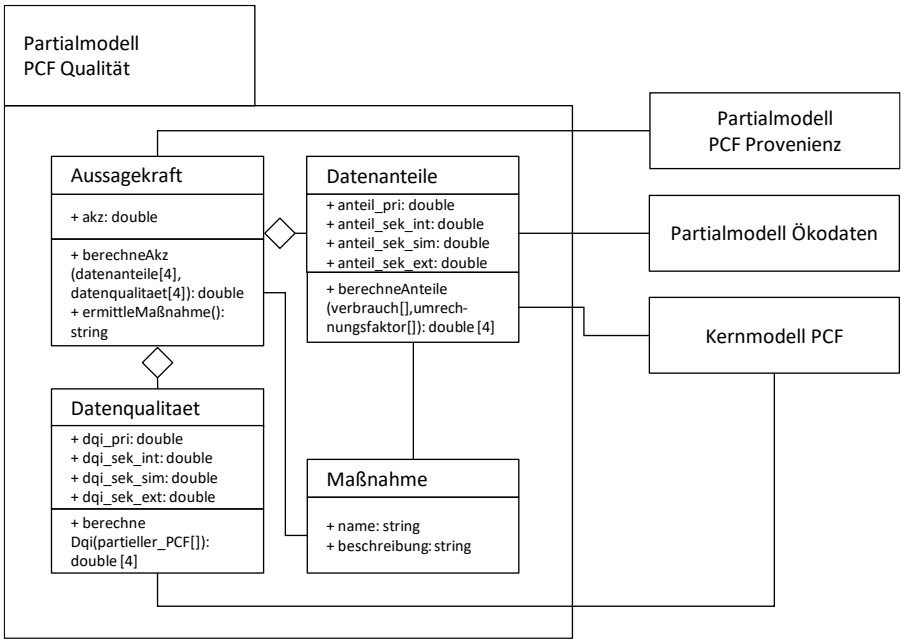


Abbildung 4-13: Partialmodell PCF Qualität des Informationsmodells zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling als UML-Klassendiagramm

Die Klasse Datenanteile setzt sich aus vier Attributen zusammen, die über die Methode *berechneAnteile* berechnet werden. Die vier Attribute lauten *anteil_pri* für den Anteil an Primärdaten, *anteil_sek_int* für den Anteil an Sekundärdaten aus internen Ökodatenbanken, *anteil_sek_sim* für den Anteil an Sekundärdaten aus Simulationsdaten und *anteil_sek_ext* für den Anteil an Sekundärdaten aus externen Ökodatenbanken. Ausgangslage zur Berechnung sind Listen, die die Verbräuche und Umrechnungsfaktoren der Operanden enthalten. Das Attribut *anteil_pri* sowie die Berechnungsformel ist auch bekannt als „primary data share“ [141]. Die Anteile der Daten dienen in einem nächsten Schritt zur Ermittlung der Aussagekraft. Um die Anteile zu berechnen, werden die Operanden aus der PCF Berechnungsformel 4-1 bezüglich des Ursprungs ihres Verbrauchswerts *V* in den vier Kategorien Primärdaten (pri), Sekundärdaten aus internen Datenbanken (sek_int), Sekundärdaten aus Simulationsdaten (sek_sim) und Sekundärdaten aus externen Datenbanken(sek_ext) gruppiert. Um den prozentualen Anteil zu erhalten, werden

die Operanden der Gruppen summiert und durch den Gesamtwert des PCF geteilt, wie die Formeln [141]4-2 bis 4-5 zeigen:

$$anteil_pri = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{pri,i} \cdot u_i}{PCF} \quad [141]4\text{-}2$$

$$anteil_sek_int = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{sek_int,i} \cdot u_i}{PCF} \quad 4\text{-}3$$

$$anteil_sek_sim = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{sek_sim,i} \cdot u_i}{PCF} \quad 4\text{-}4$$

$$anteil_sek_ext = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{sek_ext,i} \cdot u_i}{PCF} \quad 4\text{-}5$$

In der Klasse Datenqualitaet wird die Kennzahl Datenqualitätsindex (DQI) in den vier Kategorien analog zu den Datenanteilen errechnet und jeweils unter dem Attribut *dqi* mit der spezifischen Endung gespeichert. Dazu wird die gleichnamige Methode *berechneDqi* ausgeführt, die als Input eine Liste der pPCF übergeben bekommt. Jeder pPCF wird zunächst einzeln in verschiedenen Kategorien von eins bis fünf bewertet. Dabei ist es entscheidend, ob die Verbrauchswerte durch Primär-, Sekundärdaten aus Simulations- oder Sekundärdaten aus Ökodatenbanken aufgenommen werden. Außerdem wird analog zu der Anteilsberechnung zwischen Sekundärdaten aus internen (Index „sek_int“) und externen (Index „sek_ext“) Ökodatenbanken unterschieden. Die Kennzahl DQI ist im englischen Sprachraum unter „Data Quality Rating“ (DQR) gebräuchlich und wird im Kapitel 2.3.1 mit der Formel (2-1) eingeführt [128]. Die postulierte Formel wird für den Anwendungsfall dieser Dissertation adaptiert und lautet für Primär- und Sekundärdaten:

$$dqi_{pri,sek} = \frac{TR + ZR + GR + Vo + Ver + U}{6} \quad 4\text{-}6$$

Die sechs Indikatoren lauten: technologische Repräsentativität (TR), zeitbezogene Repräsentativität (ZR), geographische Repräsentativität (GR), Vollständigkeit (Vo), Verlässlichkeit (Ver) und Unsicherheit (U). Für jeden Operanden wird der DQI bestimmt, indem für die Indikatoren ein Wert von eins bis fünf vergeben wird. Ein Wert von eins bedeutet eine exzellente Abbildung – ein Wert von fünf bedeutet, dass er nicht ausreichend abgebildet ist. Eine Beschreibung der Werte der einzelnen Indikatoren für Primärdaten ist in Tabelle 4-2 zu finden. Die Grundlagen der Bewertungsmatrix von eins bis fünf sind bereits 1994 durch WEIDEMA geschaffen worden [249] und seitdem stetig weiterentwickelt, beispielsweise ist eine Adaption für die Bewertung der Daten in der externen Ökodatenbank ecoinvent zu finden [250]. In dieser Dissertation wird die Variante von CATENA-X AUTOMOTIVE NETWORK E.V. genutzt und auf den Anwendungsfall angepasst [141].

Tabelle 4-2: Bewertungskriterien für den DQI von Primärdaten adaptiert nach [141]

DQI	**1 – Exzellent**	**2 – Sehr gut**	**3 – Gut**	**5**
TR	Daten, die direkt von der Maschine bezogen werden	Daten einer ähnlichen Maschine	Durchschnittsdaten	Nicht zutreffend
ZR	Daten nicht älter als ein Jahr	Daten nicht älter als drei Jahre	Daten nicht älter als fünf Jahre	Nicht zutreffend
GR	Am Produktionsstandort gemessen	Gleiche Region oder Land	Gleicher Kontinent	Nicht zutreffend
Vo	Alle Prozesse werden im Berichtszeitraum durchgeführt	>75 % der Prozesse werden im Berichtszeitraum durchgeführt	>50 % der Prozesse werden im Berichtszeitraum durchgeführt	Nicht zutreffend
Ver	Spezifische Messungen für das Produkt und den Produktionsprozess	Produktionsstandortbezogene Messungen und Zuordnung zum Produkt	Daten beruhen teilweise auf Annahmen oder Schätzung	Nicht zutreffend
U	Unsicherheit <5 %	Unsicherheit <10 %	Unsicherheit <20 %	≥20 % oder keine Unsicherheit berechenbar

Falls keine der Kategorien eins bis drei zutreffen oder keine Unsicherheit berechenbar ist, wird für das weitere Vorgehen der Zahlenwert fünf gewählt.

Für Sekundärdaten aus internen und externen Ökodatenbanken wird die Tabelle 4-3 angewendet:

Tabelle 4-3: Bewertungskriterien für den DQI von Sekundärdaten aus internen und externen Ökodatenbanken adaptiert nach [141]

DQI	1 – Exzellent	2 – Sehr gut	3 – Gut	4 – Fair	5 – Schlecht
TR	Gleiche Produktionstechnik	Marktmix einschließlich der untersuchten Produktionstechnologie	Marktmix ohne die untersuchte Produktionstechnologie	Ähnliche Produktionstechnologien	Unterschiedliche Produktionstechnologien
ZR	Datum der Veröffentlichung des PCF liegt innerhalb der Gültigkeit des Datensatzes	Datum der Veröffentlichung des PCF ist nicht älter als zwei Jahre nach der Gültigkeit des Datensatzes	Datum der Veröffentlichung des PCF ist nicht älter als vier Jahre nach der Gültigkeit des Datensatzes	Datum der Veröffentlichung des PCF ist nicht älter als sechs Jahre nach der Gültigkeit des Datensatzes	Datum der Veröffentlichung des PCF ist älter als sechs Jahre nach der Gültigkeit des Datensatzes
GR	Datensatz aus eigener Produktion	Gleiche Region oder Land	Gleicher Kontinent	Regionen unterschiedlich, aber hinreichend ähnlich	Regionen unterschiedlich oder nicht bekannt
Vo	Datensatz ist geprüft und besitzt eine Unsicherheit	Datensatz ist geprüft	Datensatz besitzt Unsicherheit	Herkunft des Datensatzes ist bekannt	Herkunft des Datensatzes ist unbekannt
Ver	Datensatz ist vollständig gemessen	Datensatz ist hauptsächlich gemessen	Datensatz ist teilweise geschätzt	Datensatz ist zum Großteil geschätzt	Datensatz ist geschätzt

U	Unsicherheit <5 %	Unsicherheit <10 %	Unsicherheit<20 %	Unsicherheit<30 %	≥ 30 % oder keine Unsicherheit berechenbar

Für Sekundärdaten aus Simulationsdaten kann kein geographischer Indikator gemessen werden. Daher vereinfacht sich die Berechnung zu:

$$dqi_{sek_sim} = \frac{TR + ZR + Vo + Ver + U}{5} \qquad 4\text{-}7$$

Für die Bewertungskriterien von Sekundärdaten aus Simulationsdaten mit ergänzendem Spezialfall (SF) von Fertigungsprozessen gilt Tabelle 4-4:

Tabelle 4-4: Bewertungskriterien für den DQI von Sekundärdaten aus Simulationsdaten mit ergänzendem SF von Fertigungsprozessen

DQI	**1 – Exzellent**	**2 – Sehr gut**	**3 – Gut**	**5**
TR	Simulation bildet den realen Zustand ideal ab *SF: Maschinensimulation mit eigener Steuerung*	Simulation bildet den realen Zustand mit vernachlässigbaren Einschränkungen ab *SF: Maschinensimulation mit kinematischem Modell*	Simulation bildet den realen Zustand mit Schätzungen ab *SF: Werkzeugpfad verwendet*	Nicht zutreffend
ZR	Simulation nicht älter als ein Jahr	Simulation nicht älter als zwei Jahre	Simulation nicht älter als vier Jahre	Nicht zutreffend
Vo	Reale Parameter sind bekannt *SF: Reale Verbrauchsdaten der Maschine sind bekannt*	Reale Parameter sind abgeschätzt *SF: Reale Verbrauchsdaten der Maschine sind abgeschätzt*	Reale Parameter sind unbekannt *SF: Reale Verbrauchsdaten der Maschine sind unbekannt*	Nicht zutreffend
Ver	Alle Prozesse sind simuliert	Prozesse sind hauptsächlich simuliert	Prozesse fehlen oder müssen geschätzt werden	Nicht zutreffend

U	Unsicherheit <5 %	Unsicherheit <10 %	Unsicherheit <20 %	≥ 20 % oder keine Unsicherheit berechenbar

Analog zur Tabelle mit Primärdaten wird der Zahlenwert fünf für das weitere Vorgehen gewählt, falls die Kategorien eins bis drei nicht zutreffen oder keine Aussage möglich ist.

Um den Gesamtwert der einzelnen DQI zu erhalten, werden diese mit dem prozentualen Anteil am PCF der gewählten Kategorie gewichtet:

$$dqi_pri = \frac{\sum_{i=1}^{n} dqi_{pri,i} \cdot PCF_{pri,i}}{\sum_{i=1}^{n} PCF_{pri,i}} \qquad 4\text{-}8$$

$$dqi_sek_int = \frac{\sum_{i=1}^{n} dqi_{sek_int,i} \cdot PCF_{sek_int,i}}{\sum_{i=1}^{n} PCF_{sek_int,i}} \qquad 4\text{-}9$$

$$dqi_sek_sim = \frac{\sum_{i=1}^{n} dqi_{sek_sim,i} \cdot PCF_{sek_sim,i}}{\sum_{i=1}^{n} PCF_{sek_sim,i}} \qquad 4\text{-}10$$

$$dqi_sek_ext = \frac{\sum_{i=1}^{n} dqi_{sek_ext,i} \cdot PCF_{sek_ext,i}}{\sum_{i=1}^{n} PCF_{sek_ext,i}} \qquad 4\text{-}11$$

Die vier Indikatoren *dqi_pri*, *dqi_sek_int*, *dqi_sek_sim* und *dqi_sek_ext* werden in der Klasse Datenqualitaet unter den entsprechenden Attributen gespeichert. Die beiden Klassen Datenanteile und Datenqualitaet werden durch eine Aggregation mit der Klasse Aussagekraft verbunden. Die drei Attribute liefern Informationen zur Berechnung der Aussagekraftzahl die im gleichnamigen Attribut *akz* festgehalten wird, nachdem die Methode *berechneAkz* ausgeführt wird. Der Kennwert errechnet sich nach der Formel 4-12:

$$\begin{aligned} akz = \quad & 101 - (anteil_pri \cdot dqi_pri + \\ & 15 \cdot anteil_sek_int \cdot dqi_sek_int + \\ & 15 \cdot anteil_sek_sim \cdot dqi_sek_sim + \\ & 20 \cdot anteil_sek_ext \cdot dqi_sek_ext\ ) \end{aligned} \qquad 4\text{-}12$$

Die Formel der Aussagekraftzahl (AKZ) ist angelehnt an die Risikoprioritätszahl (RPZ), die in Kapitel 2.3.3 als wichtigste Kenngröße einer FMEA beschrieben wird. Den einzelnen Summanden werden analog zur RPZ eine Gewichtung zugeschrieben, die ursprünglich eine Bedeutung des „Risikos“ ausdrückt. Je höher der Zahlenwert der RPZ, desto dringlicher ist eine Aktion zu tätigen, um das Risiko zu minimieren. Da die AKZ als positive Zahl assoziiert ist, wird der Maximal- und Minimalwert durch eine Subtraktion umge-

kehrt. Es ergibt sich ein Bereich von 1 bis 100, bei der der Wert 100 ein Optimum ausdrückt. Es werden die Anteile von Primärdaten mit dem Faktor 1, die Anteile von Sekundärdaten aus internen Ökodatenbanken mit dem Faktor 15, Simulationsdaten ebenfalls mit dem Faktor 15 und die Sekundärdaten mit dem Faktor 20 versehen. Diese Faktoren beruhen auf Erfahrungswerten und priorisieren Primärdaten. Die Verwendung von Sekundärdaten aus internen Ökodatenbanken und Simulationsdaten besitzen eine identische Wertigkeit, da davon ausgegangen wird, dass die internen Datensätze ausschließlich bei einer passgenauen Übereinstimmung verwendet werden. Sekundärdaten aus externen Ökodatenbanken sollten nur in Ausnahmefällen verwendet werden und besitzen in Relation zu den anderen Datentypen die geringste Wertigkeit. Die Faktoren sollten nach Bedarf angepasst werden. Aufgrund der Bestandteile der AKZ lassen sich Maßnahmen ableiten, um die Aussagekraft zu steigern. Diese werden durch die Klasse Maßnahme gelistet. Die Klasse besitzt einen *namen* und eine *beschreibung*. Eine Liste ausgewählter Maßnahmen zeigt Tabelle 4-5. Maßnahmen können außerdem aus den Tabellen 4-2 bis 4-4 abgeleitet werden. Durch eine Analyse der Fehlerursache wird eine Maßnahme mittels der Methode *ermittleMaßnahme* vorgeschlagen.

Tabelle 4-5: Ausgewählte Maßnahmen inklusive Hilfsmittel zur Steigerung der Aussagekraftzahl des PCF

Fehlerursache	**Maßnahme**	**Hilfsmittel**
Unsicherheit hoch	Unsicherheit reduzieren (für konkrete Maßnahmen siehe [241])	Analyse der Unsicherheitsfaktoren
Anteil von Sekundär zu hoch	Primärdaten erheben	Sensorik und Digitaler Zwilling
TR-Wert zu hoch	Daten direkt aus der Produktionsmaschine beziehen	
ZR-Wert oder Vo-Wert zu hoch	Datensätze aktualisieren	
Ver-Wert zu hoch	Schätzungen durch Berechnungen ersetzen	
GR-Wert zu hoch	Regionalität eingrenzen, Datensätze durch eigene Maschine erzeugen	

4.4.5 Partialmodell PCF Provenienz

Die vorgestellten Berechnungen können in ihrer Komplexität variieren. Je mehr Ein- und Ausgangsgrößen in der Sachbilanz aufgestellt werden, desto mehr Berechnungen sind durchzuführen, die sich in der Art der Datenquelle unterscheiden können und somit die Komplexität erhöhen. Darüber hinaus sind bei der PCF Berechnung Entscheidungen zu treffen, die das Ergebnis stark beeinflussen können wie beispielsweise die Wahl der Systemgrenze. Nach ISO 14067 sind sämtliche maßgebliche Themen in einer frei zugänglichen, umfassenden und verständlichen Darstellung der Informationen zu behandeln und zu dokumentieren [104]. Getroffene Annahmen sollen offengelegt und Schätzwerte eindeutig erläutert werden [104]. Die Art und Weise dieser Transparenzschaffung wird in dieser Dissertation durch das Partialmodell PCF Provenienz festgelegt. Dabei erfüllt das Partialmodell zwei Funktionen: Zum einen werden die Berechnungen und Entscheidungen transparent dokumentiert, zum anderen kann eine Analyse von Schwachstellen und Hauptverursachern des PCF durchgeführt werden. Es entsteht eine Basis für Entscheidungen zur Reduktion des PCF und zur Analyse von Schwachstellen. Das UML-Klassendiagramm des Partialmodells PCF Provenienz ist in Abbildung 4-14 zu sehen:

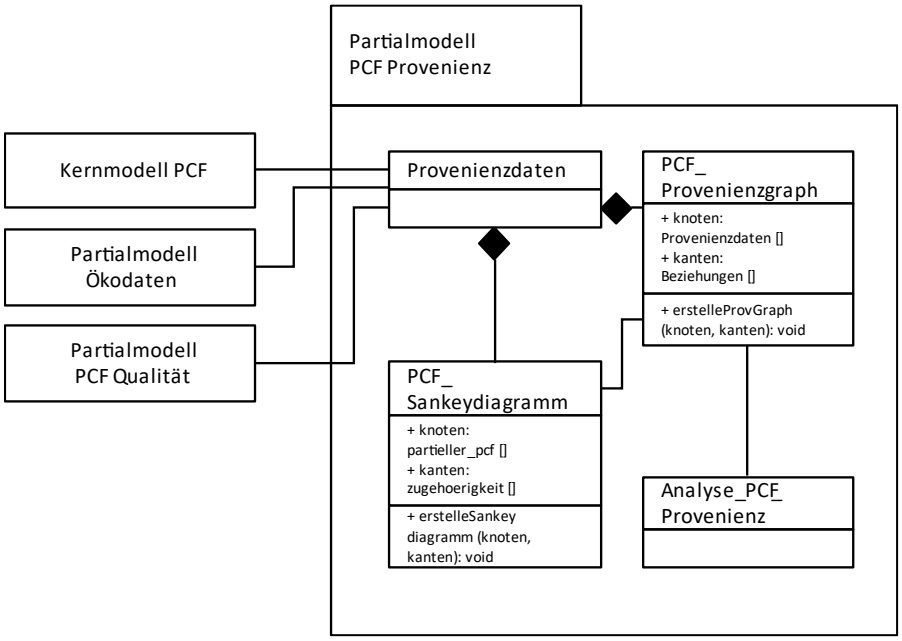


Abbildung 4-14: Partialmodell PCF Provenienz des Informationsmodells zur Integration des PCF in den Digitalen Zwilling als UML-Klassendiagramm

Das Partialmodell PCF Provenienz besteht aus vier Klassen. Die zentrale Klasse lautet Provenienzdaten. Dort werden die Informationen zum Ursprung der Daten gesammelt und gespeichert. Über Assoziationen ist die Klasse mit dem Kernmodell PCF, dem Partialmodell Ökodaten und dem Partialmodell PCF Qualität verbunden, aus welchen die Daten stammen. Die Klasse Provenienzdaten besitzt Kompositionen zu den Klassen

PCF_Provenienzgraph und PCF_Sankeydiagramm. Diese beiden existenzabhängigen Klassen dienen als Werkzeuge zur Visualisierung der Provenienzdaten. Über einen graphenbasierten Ansatz werden die Attribute *knoten* und *kanten* in beiden Klassen beschrieben. Die Knoten des Provenienzpgrahen entsprechen den Provenienzdaten, wohingegen die Kanten die Beziehungen zwischen den Provenienzdaten repräsentieren. Im Falle des Sankeydiagramms repräsentieren die Knoten die Werte des pPCF und die Kanten die Zugehörigkeit zu einem Bauteil oder einem übergeordneten PCF. Über die Methode *erstelleSankeydiagramm* wird das entsprechende Diagramm erzeugt. Durch ein Sankeydiagramm werden Mengenflüsse graphisch dargestellt, indem die Mengen durch proportional dicke Pfeile repräsentiert werden. Ursprünglich dienen Sankeydiagramme dazu, Energiebilanzen mit Aufteilung auf verschiedene Quellen und Senken zu visualisieren [251]. Sie sind unter anderem auch als Energieflussbild bekannt [252]. Sie werden darüber hinaus für andere Themenfelder adaptiert. Eine beispielhafte Darstellung eines Sankeydiagramms in Adaption auf den PCF ist in Abbildung 4-15 zu sehen:

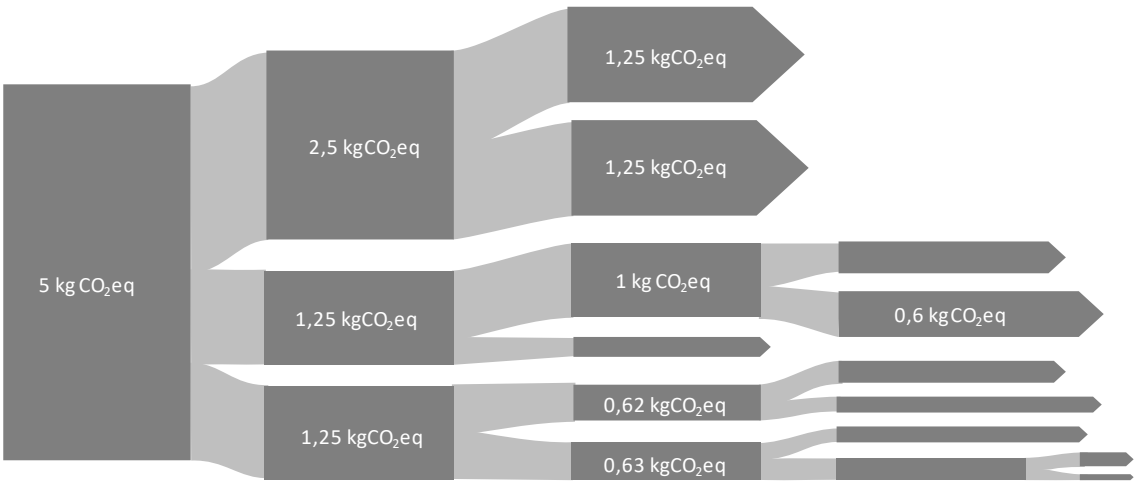


Abbildung 4-15: Beispielhafte Darstellung eines Sankeydiagramms für CO_2-Äquivalente

Der PCF Wert von 5 kg CO_2eq (100 % – Stufe null) wird durch die erste Stufe in drei Teile zu 2,5 kg CO_2eq (50 %) und zweimal 1,25 kg CO_2eq (25 %) aufgespaltet. Es folgen weitere Stufen mit Teilung des PCF in die prozentualen Anteile bis die Stufen sich nicht weiter teilen lassen. Beispielsweise ist in der ersten Stufe der PCF (100 %) auf eine Energiekomponente (50 %) und zwei Materialkomponenten (je 25 %) zurückzuführen. Die Materialkomponenten können ebenfalls in ihre Bestandteile zerlegt werden, die wieder eine eigene Energiekomponente besitzen können. Im Diagramm ist die Dicke der Rechtecke proportional zum errechneten Wert, was dazu führt, dass die Hauptverursacher sich mit der Darstellung im Sankeydiagramm visuell identifizieren lassen. Anschließend kann durch die Methode *erstelleProvgraph* der Klasse PCF_Provenienzgraph aus den Provenienzdaten ein Graph erzeugt werden. Dieser Graph orientiert sich am PROV-Modell,

welches in Kapitel 2.3.4 vorgestellt wird. Beispielhaft wird ein PCF Provenienzgraph in Abbildung 4-16 gezeigt.

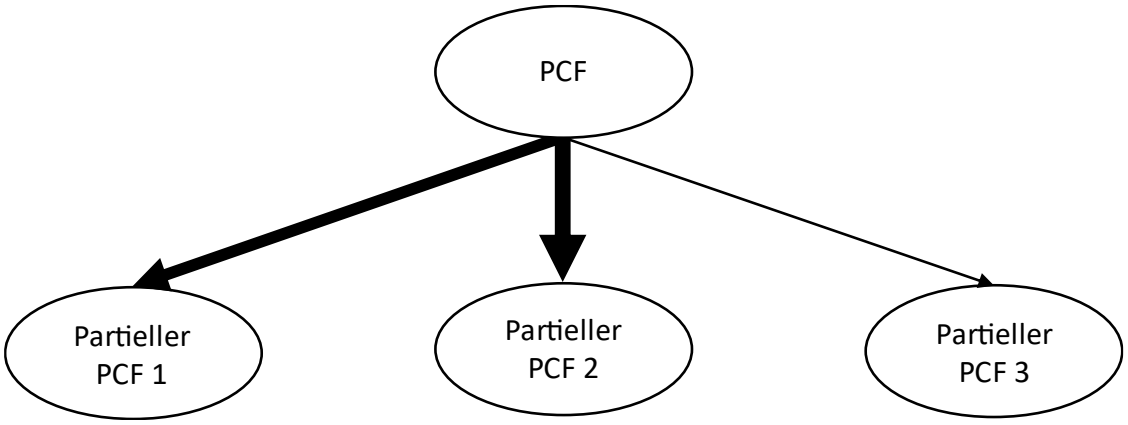


Abbildung 4-16: PCF Provenienzgraph eines PCF mit drei pPCF als Entitäten und variierenden Pfeilstärken

Analog zum Sankeydiagramm wird der PCF in seine Bestandteile aufgespaltet. Diese werden als pPCF bezeichnet, welche nach ISO 14067 die Prozesse beschreiben, die einen Anteil am PCF besitzen [104]. Ebenfalls sind die Dicken der Pfeile proportional zum jeweiligen Mengenwert. In einer nächsten Stufe können die pPCF in weitere Bestandteile zerlegt werden. In der Adaption der PROV-Methode werden der PCF und pPCF als Entitäten abgebildet (Ellipse). Die Entitäten lassen sich um Informationen zu deren Ursprung erweitern. Beispielhaft ist dies in der Abbildung 4-17 für den pPCF 2 zu sehen.

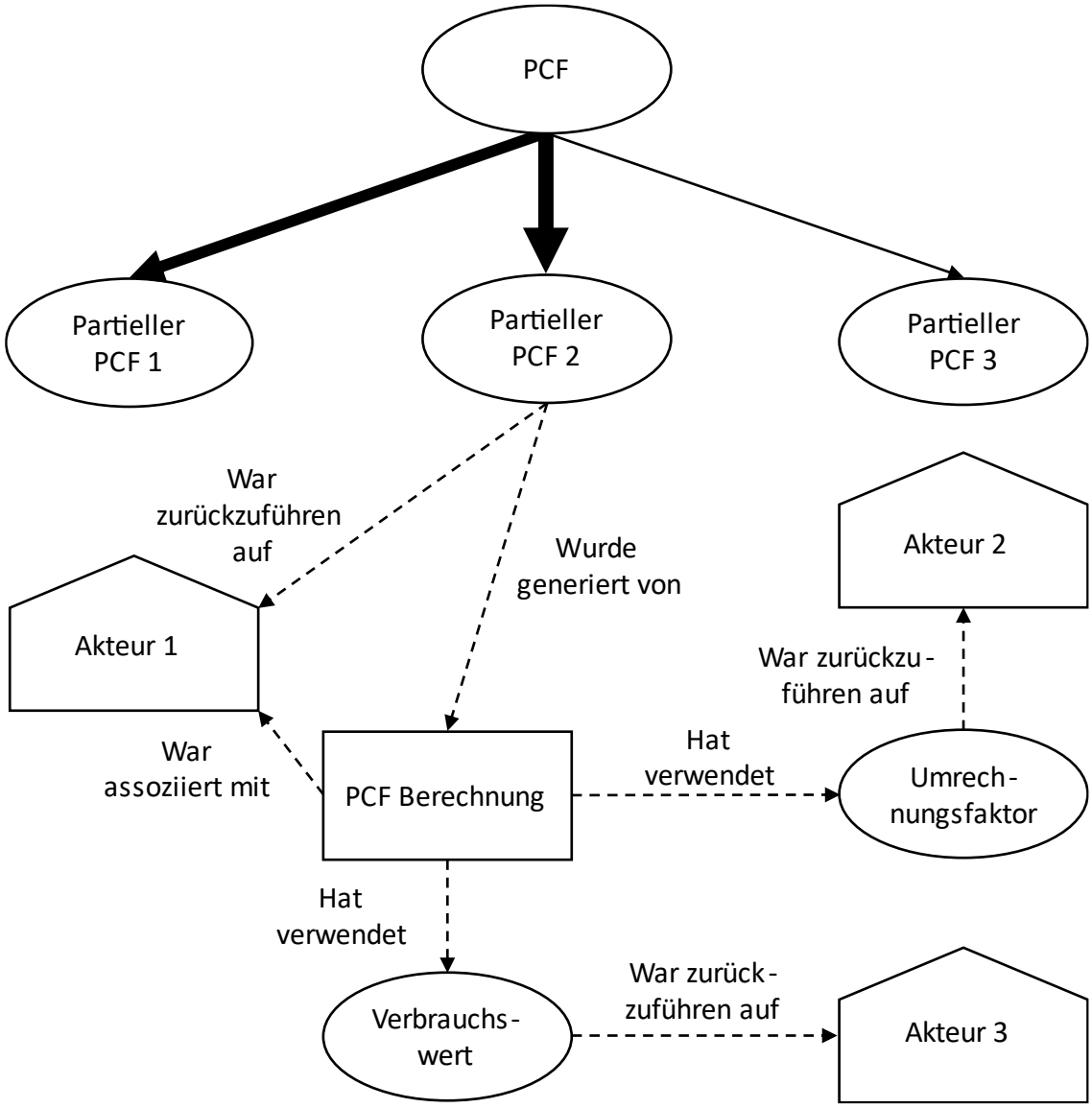


Abbildung 4-17: Erweiterung des pPCF 2 um Aktivitäten, weitere Entitäten und Akteure der PCF Berechnung

Die Berechnungsgrundlage für den pPCF 2 ist die PCF Berechnung, die als Aktivität (Rechteck) abgebildet wird. Diese Aktivität besitzt einen Akteur (Fünfeck mit zwei rechten Winkeln), der für die PCF Berechnung verantwortlich ist. Im Zuge einer PCF Berechnung werden zwei Entitäten verwendet: der Verbrauchswert *V* und der Umrechnungsfaktor *u*, die zusammen den Operanden des PCF bilden (siehe Formel 4-1 in Kapitel 4.4.2). Die beiden Entitäten können jeweils auf Akteure zurückgeführt werden. Beispielsweise ist der Akteur eines Umrechnungsfaktors (Akteur 2) ein Mitarbeiter der externen Ökodatenbank, der den Prozess aufgesetzt hat. Der Akteur des Verbrauchswertes (Akteur 3) hat die Messung des Verbrauchs zu verantworten. Akteure können neben Personen auch Systeme sein. Im vorliegenden Fall können der Akteur 1 und Akteur 3 Digitale Zwilling sein, welche die Verbrauchswerte ermitteln und die PCF Berechnung

automatisiert durchführen. Der PCF Provenienzgraph in Abbildung 4-17 kann durch weitere Entitäten, Aktivitäten und Akteure ergänzt werden.

Nachdem das PCF Sankeydiagramm und der PCF Provenienzgraph erstellt worden sind, können diese zur Analyse genutzt werden. Die Analysekriterien sind frei wählbar und richten sich nach dem Zweck der Analyse. Eine Möglichkeit besteht darin, die Hauptverursacher des PCF ausfindig zu machen und die Berechnung auf Unsicherheit und Aussagekraft zu untersuchen. Eine weitere Möglichkeit ist die Analyse auf Vollständigkeit und Transparenz der Berechnung. Diese muss durch Dritte nachvollziehbar sein.

4.4.6 Integration der Teilmodelle in ein Gesamtmodell

Die zuvor erläuterten Teilmodelle werden in diesem Kapitel in ein Gesamtmodell überführt. Die Ausgangslage des Konzepts besteht aus dem Produktstruktur- und dem Geometriemodell des zu untersuchenden Bauteils. Für das Format wird das STEP-Format in der AP 242 gewählt, da es sowohl das Produktstrukturmodell als auch das Geometriemodell beinhaltet. Das STEP-Format gewährleistet eine Systemunabhängigkeit für Datenspeicherung- und Austausch sowie eine Verknüpfung von Informationen. Die Methoden und Informationsflüsse der Teilmodelle lassen sich in einen chronologischen Ablauf einordnen. Der Ablauf des Konzepts wird in der Abbildung 4-18 veranschaulicht. Im ersten Schritt muss das entsprechende Produktstruktur- und Geometriemodell in das System über die Organisationseinheit Digitaler Master/Digitaler Zwilling importiert werden. Nach dem Import des Produktstruktur- und Geometriemodells wird die PCF Berechnung initialisiert und die Quellen der Ökodaten bestimmt, welche durch die entsprechende Subaktivität im Kernmodell PCF detailliert beschrieben wird.

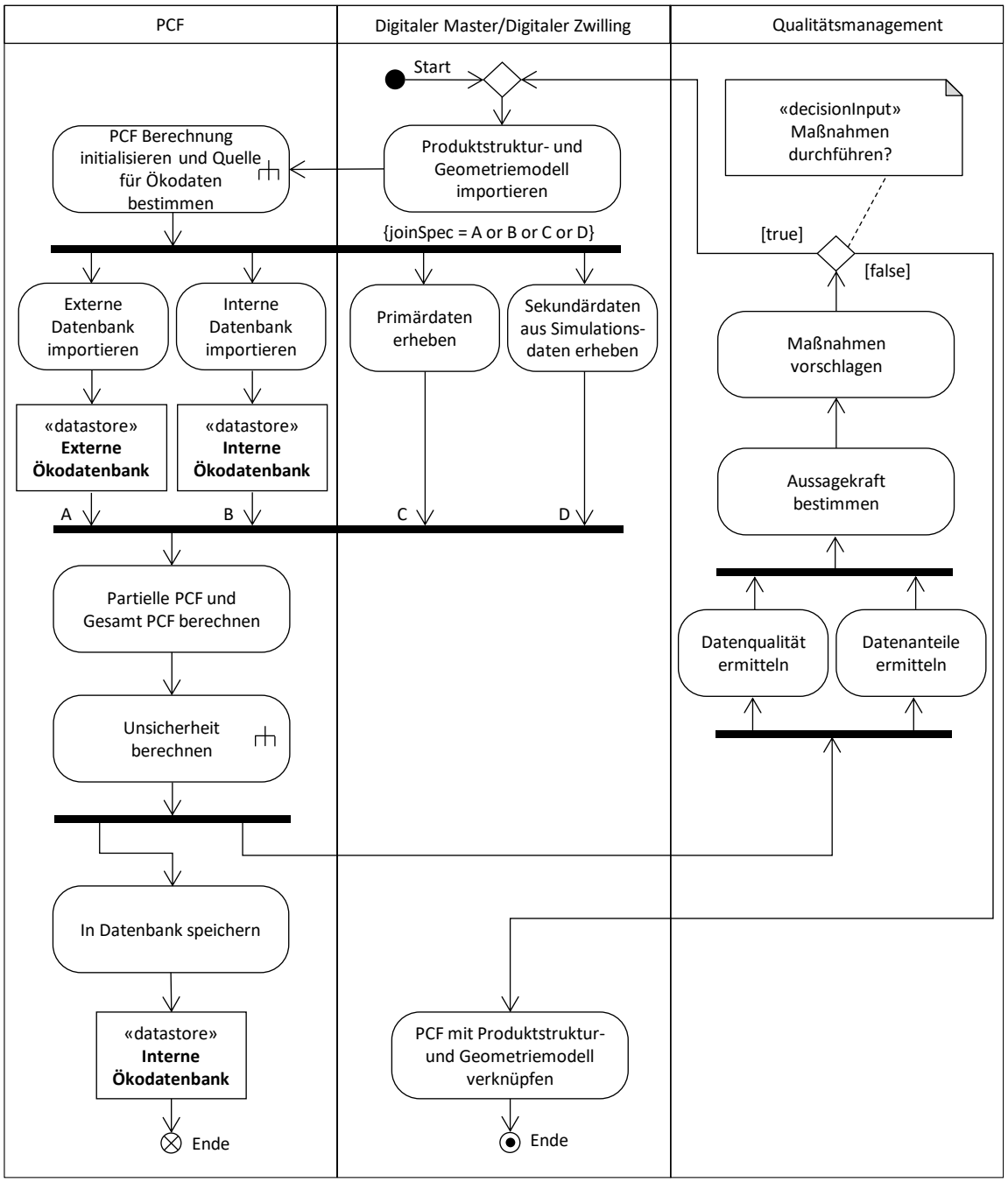


Abbildung 4-18: Aktivitätsdiagramm des Gesamtmodells zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling

Nach der Bestimmung der Datenquellen werden diese aus den vier Kategorien externe und interne Ökodatenbank, Primärdaten und Sekundärdaten aus Simulationsdaten erhoben. Beispielsweise werden durch den Digitalen Zwilling Primärdaten einer Produktionsmaschine erfasst. Diese müssen mit einem Zeitstempel der Fertigung des Produkts auf dessen individuellen Verbrauch reduziert werden. Weitere Datensätze wie Ausschlussprodukte oder Kühlschmierstoff werden anteilig auf das Produkt allokiert, was ebenfalls in diesem Schritt erfolgt. Werden Daten aus Ökodatenbanken benötigt, so

werden diese zunächst importiert. Der Import erfolgt über eine direkte Datenbankverbindung. Es können auch spezielle python-Bibliotheken, die für Ökodatenbanken entwickelt wurden, oder Schnittstellen wie Representational State Transfer Application Programming Interface (REST API) oder standardisierte Formate wie XML sowie JavaScript Object Notation (JSON) oder comma-separated values-Dateien (CSV) genutzt werden. Es folgt die Berechnung der pPCF durch die Multiplikation von Verbrauchswert und Umrechnungsfaktor sowie die Berechnung des Gesamt PCF durch die Summenbildung der Operanden. Ergänzt wird die PCF Berechnung durch die Ermittlung der Unsicherheit. Beide Aktivitäten sind im Kernmodell PCF beschrieben. Nach Abschluss der Berechnungen erfolgt zum einen die Speicherung in einer internen Ökodatenbank und zum anderen wird der PCF in der Organisationseinheit Qualitätsmanagement weiter untersucht. Im ersten Schritt des Qualitätsmanagements findet eine Ermittlung der Datenqualität statt, indem für jeden Operanden der DQI bestimmt wird. Parallel werden die Datenanteile von Primär-, Sekundärdaten aus Simulationsdaten und Sekundärdaten aus internen und externen Ökodatenbanken ermittelt, die eine prozentuale Verteilung der Anteile am Gesamt PCF in den jeweiligen Kategorien darstellen. Sind die Werte für die Datenqualität und Datenanteile vorhanden, wird die Aussagekraftzahl errechnet. Zur Steigerung der Aussagekraft werden anschließend Maßnahmen vorgeschlagen, je nach identifizierten Schwachstellen der Berechnung. Werden Maßnahmen durchgeführt wie beispielsweise der Einbau von zusätzlicher Sensorik oder Veränderung der Geometrie, wird die PCF Berechnung neu gestartet. Sollen keine Maßnahmen durchgeführt werden, wird der PCF mit dem Produktstruktur- und Geometriemodell verknüpft. Die Verknüpfung erfolgt durch eine XML-Datei mit den Informationen des PCF, die mit den zugehörigen Produktentitäten oder geometriebezogenen Entitäten der STEP-Datei beschrieben werden. Neben dem Gesamt PCF, welcher mit der Produktentität des Einzelteils oder der Baugruppe verbunden wird, können entsprechende Entitäten der STEP-Datei mit den zugehörigen Prozessen in Verbindung gebracht werden. Die pPCF von Prozessen der Volumenveränderungen wie beispielsweise Fräsprozesse werden auf die geometriebezogene Körperentität verwiesen. Analog werden die pPCF von Oberflächenprozessen wie beispielsweise ein Reinigungsprozess mit der geometriebezogenen Oberflächenentität verbunden. In der Repräsentation von STEP gilt eine schematische Modellbildung, um die entsprechenden Entitäten zu identifizieren. Die beiden genannten geometriebezogenen Entitäten für Körper und Oberflächen sind in den Entitäten *manifold solid brep* für Körper und *closed shell* für das Oberflächen zu finden. Aufbauend auf HAAG können sich Elementfamilien, sogenannte Features wie Bohrungen, aus Kombination von zwei- und dreidimensionalen Geometrieelementen ergeben [34]. Um die entsprechenden En-

titäten wie Features oder Flächen zu suchen, wird auf [34] verwiesen. Diese können anschließend direkt mit den entsprechenden pPCF der Operation wie einer Bohrung in Verbindung gebracht werden. Eine weitere Möglichkeit zur Verknüpfung des PCF mit dem Produktmodell neben der Verlinkung über eine XML-Datei ist die Einbringung von nutzerdefinierten Attributen (engl. *user defined attributes*) direkt in der STEP-Datei. Dort können die Werte des PCF gespeichert werden und eine Referenz zu einer Entität mit dem jeweiligen Hash hergestellt werden.

Abschließend ergibt sich das Gesamtmodell der Integration des PCF in den Digitalen Zwilling als verknüpftes UML-Klassendiagramm der Partialmodelle in Abbildung 4-19:

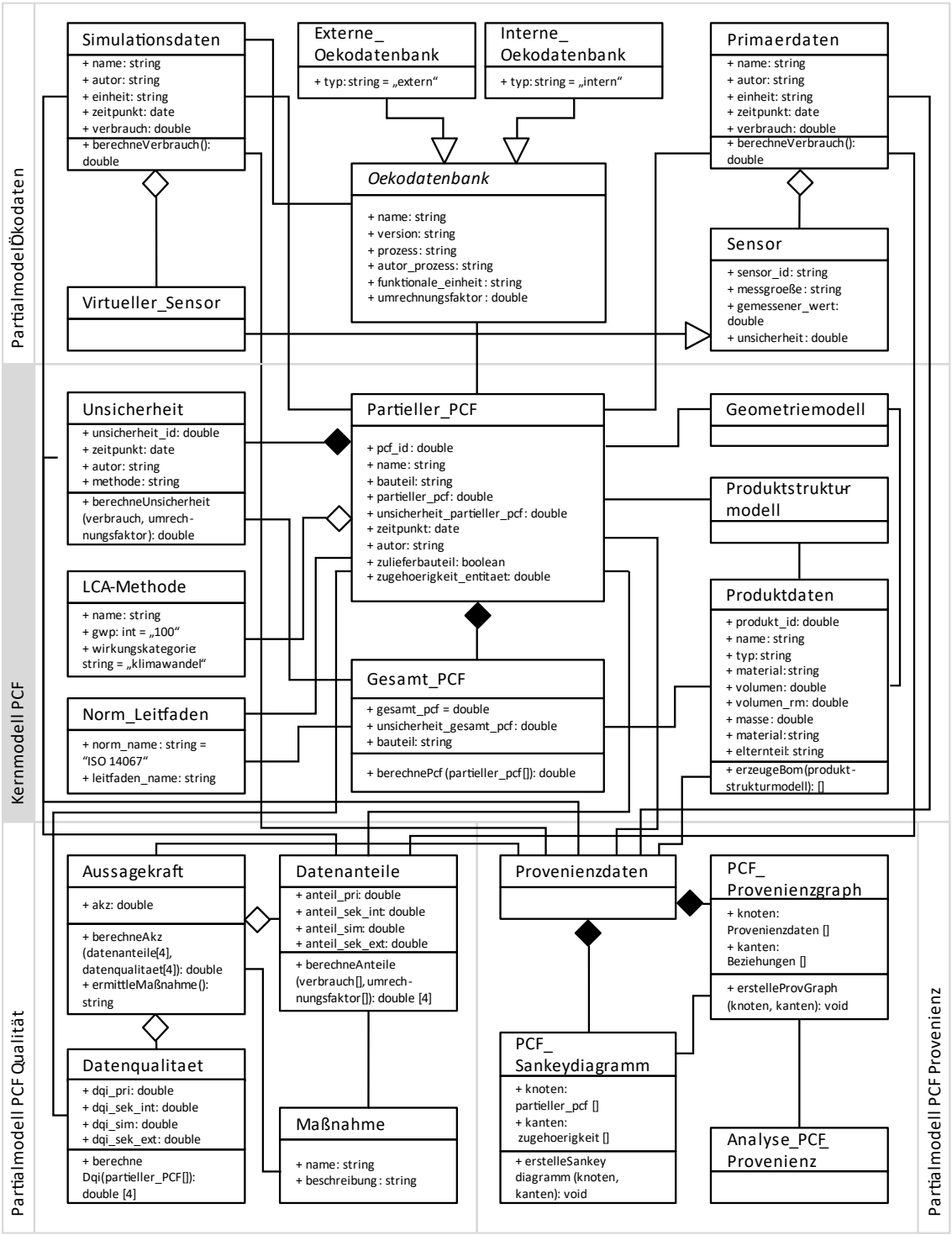


Abbildung 4-19: Gesamtmodell der Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling als UML-Klassendiagramm

4.5 Fazit und Zusammenfassung

Aufbauend auf dem Handlungsbedarf und dem Anforderungsprofil in Kapitel 3 wird im Kapitel 4 das Konzept des Informationsmodells zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling entwickelt. Im ersten Teil der Vorstellung des Konzepts

werden Begriffe definiert, die zum konsistenten Verständnis der folgenden Erläuterungen innerhalb des Konzepts beitragen. An die Definition der Begrifflichkeiten schließt eine Beschreibung der konzeptionellen Vorgehensweise an, die mit vier Forschungsfragen endet. Diese präzisieren das Ziel dieser Dissertation durch die Fragen nach der Art und Weise, wie ein PCF inklusive Unsicherheit und automatisiert berechnet werden kann, wie ein Qualitätsmanagement zum PCF gestaltet sein kann und wie die Transparenz gewährleistet werden kann. Im darauffolgenden Kapitel soll diesen Forschungsfragen nachgegangen werden. Dazu wird das Konzept beschrieben, dessen Kern ein Informationsmodell bildet. Das Informationsmodell wird zunächst in Sichten aus Produktlebensweg und Produktentwicklung eingeordnet. Dabei kann zwischen den Informationen aus dem Digitalen Master und den Informationen aus dem Digitalen Schatten differenziert werden.

Das Informationsmodell wird in ein Kernmodell und drei Partialmodelle untergliedert, welche in den jeweiligen Unterkapiteln beschrieben werden. Das Kernmodell widmet sich der Berechnung und Speicherung des PCF. Je nach Phase des Produktlebenszyklus wird eine unterschiedliche Berechnungsgrundlage gewählt. Dafür wird eine kaskadierende Entscheidungslogik vorgestellt, die definiert, welche Art von Datenquellen zu nutzen sind. Primärdaten sind Sekundärdaten vorzuziehen, da sie den tatsächlichen Verbrauch des Produkts messen. Ist die Erhebung der Primärdaten nicht möglich, werden die Verbräuche durch Sekundärdaten aus Simulationen der Fertigungsprozesse angenähert. Können auch keine Sekundärdaten aus Simulationsdaten erhoben werden, muss der Verbrauch durch Sekundärdaten aus Ökodatenbanken, Literaturwerten oder durch Schätzungen von Experten ermittelt werden. Zur Berechnung des PCF wird zunächst eine Sachbilanz durchgeführt, die die Eingangs- und Ausgangsgrößen der Prozesse auflistet. Die jeweiligen Größen werden anschließend in Operanden aufgeteilt, die sich aus einem Verbrauchswert und einem Umrechnungsfaktor zusammensetzen und als Summe den PCF bilden. Ergänzt wird die Berechnung des PCF durch eine Ermittlung der Unsicherheit. Hierbei werden zwei Ansätze vorgestellt: eine analytische und eine probabilistische Methode. Die Wahl der Methode unterliegt Anforderungen, die im Kernmodell beschrieben werden. Anschließend wird je nach Art der Datenquellen aufgezeigt, wie die Unsicherheit zu berechnen ist.

Das Partialmodell Ökodaten befasst sich mit der Erzeugung der Verbrauchsdaten, die zur Berechnung des PCF genutzt werden. Grundlegend wird zwischen dem Konzept des Digitalen Masters, welcher die Daten und Modelle aus der Produktentwicklung beinhaltet, und dem Digitalen Schatten unterschieden, der die Prozessdaten einer Fertigungsmaschine als Primärdaten bereitstellt. Im Idealfall können die Verbrauchsdaten aus der Sachbilanz als Primärdaten erhoben werden. Dazu werden die benötigten Schritte, wie

die Verbrauchsdaten mittels Sensorik aufgenommen werden können, im Partialmodell beschrieben. Weiterhin wird das Vorgehen erläutert, wie Simulationsdaten zur Annäherung der realen Verbräuche genutzt werden können. Dazu wird das Konzept der virtuellen Sensoren genutzt, welche die Verbräuche während der Durchführung einer Simulation abbilden. Die Simulation kann in drei Stufen eingeteilt werden, die von einem generischen bis zu einem maschinenspezifischen Ansatz reichen. Der maschinenspezifische Ansatz ist beispielsweise eine Simulation, die mit eigener Steuerung der Maschine durchgeführt wird. Der generische Ansatz ist eine Simulation der Verfahrwege ohne kinematisches Modell der Maschine.

Das Partialmodell PCF Qualität umfasst das Qualitätsmanagement, welches auf dem Kernmodell PCF und dem Partialmodell Ökodaten aufbaut. Als Qualitätsbewertung des PCF wird die Kennzahl Aussagekraftzahl im Partialmodell entwickelt. Um diese zu berechnen, müssen im ersten Schritt die Datenanteile von Primär-, Sekundärdaten aus Simulationsdaten und Sekundärdaten aus Ökodatenbanken ermittelt werden. Die jeweiligen Formeln werden dazu bereitgestellt. Im zweiten Schritt wird die Datenqualität der Operanden untersucht. Diese setzt sich aus der Bewertung von sechs Kategorien zusammen, die mit einer Punkteskala bewertet werden. Für die Fälle von Primär-, Sekundärdaten aus Simulationsdaten und Sekundärdaten aus Ökodatenbanken wird je eine Tabelle mit einer Beschreibung zur Punktevergabe präsentiert. Anschließend wird aus den Kennzahlen eine Gesamtkennzahl in Form der Aussagekraftzahl errechnet. Neben der Berechnung werden ausgewählte Maßnahmen vorgestellt, die eine mögliche Erhöhung der Aussagekraft bewirken können.

Das Partialmodell PCF Provenienz dient zur Schaffung der Transparenz der Aktionen der zuvor beschriebenen Methoden. Es kann somit als eine Art Protokoll der PCF Berechnung verstanden werden. Die Daten zur Berechnung werden in Knoten und Kanten als Provenienzdaten gespeichert. Diese lassen sich in zwei Arten von Darstellungen unterteilen: ein PCF Sankeydiagramm und ein PCF Provenienzgraph. Zunächst wird das Sankeydiagramm als Flussdiagramm beschrieben, in dem die Anteile des PCF als proportional dicke Pfeile dargestellt werden. Die Anteile lassen sich je nach gewünschtem Detailgrad in Stufen darstellen. In Analogie zum Sankeydiagramm wird der der Provenienzgraph erstellt. Dort wird das Prinzip der variierenden Pfeildicken aus dem Sankeydiagramm weiterverwendet. Im Provenienzgraph wird der PCF in seine Bestandteile aufgespaltet, die als pPCF abgebildet werden. Die Darstellung erfolgt über Entitäten, die eine Erweiterung der Informationen zu deren Ursprung zulassen. Diese Erweiterung visualisiert die zu Grunde liegenden Ursprünge der Verbrauchsdaten und Umrechnungsfaktoren inklusive verantwortlicher Autoren. Durch die graphische Darstellung der Daten zum

PCF lassen sich Schwachstellen und Hauptverursacher identifizieren, die somit eine Basis für Optimierungen zur Reduktion des PCF und zur Steigerung der Aussagekraft schaffen.

Nach den Erläuterungen zu den Teilmodellen folgt deren Integration in ein Gesamtmodell. Dieses beschreibt einen möglichen, chronologischen Ablauf der Aktivitäten sowie Methoden des Konzepts und zeigt die Interaktionen zwischen den Teilmodellen auf. Der Ablauf wird als UML-Aktivitätsdiagramm dargestellt, welches durch das Gesamtmodell als UML-Klassendiagramm ergänzt wird.

Das Gesamtmodell des Informationsmodells zur Integration des PCF in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling wird als Grundgerüst zur Implementierung genutzt. Im Folgenden wird eine prototypische Implementierung vorgestellt, um eine Praxistauglichkeit des Konzepts zu demonstrieren. Die prototypische Implementierung wird anschließend zur Validierung des Konzepts verwendet.

5 Prototypische Implementierung

Im Anschluss an die konzeptionelle Entwicklung des Informationsmodells zur Integration des CO_2-Fußabdrucks von Produkten in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling wird in diesem Kapitel die technische Umsetzbarkeit des Konzepts geprüft. Diese Überprüfung findet in Form einer prototypischen Implementierung statt.

Im Rahmen der praktischen Umsetzung werden das Kernmodell und die drei Partialmodelle mit ihren vorgestellten Methoden in das Anwendungssystem CO_2mpass überführt, welches die Schnittstelle zu einem Anwender bildet. Der Name des Anwendungssystems ist eine Kombination aus der chemischen Formel von Kohlenstoffdioxid (CO_2), welches das Treibhausgas beschreibt, auf das die weiteren Treibhausgase als CO_2-Äquivalente umgerechnet werden, sowie dem Navigations- und Orientierungsgegenstand Kompass. Im ersten Teil des Kapitels werden die Implementierungsarchitektur und die verwendeten Technologien beschrieben. Es folgen Erläuterungen zum entwickelten Assistenzsystem. Abschließend wird ein Fazit gezogen.

Nach der Vorstellung der prototypischen Implementierung findet in Kapitel 6 eine Validierung mit einem repräsentativen Anwendungsfall statt.

5.1 Implementierungsarchitektur und Technologien

Das Ziel dieses Kapitels ist ein programmiertechnisch umgesetzter, funktionaler Prototyp. Um dies zu erreichen, wird für das Assistenzsystem CO_2mpass eine Implementierungsarchitektur bestehend aus den drei Stufen Informations-, Operations- und Anwendungsschicht genutzt. In der Abbildung 5-1 werden die Implementierungsarchitektur und die verwendeten Technologien dargestellt.

Das Assistenzsystem interagiert mit dem Digitalen Zwilling, der den Digitalen Master und Digitalen Schatten beinhaltet. Über eine Schnittstelle werden aus dem CAD-System (Siemens NX) das Produktstruktur- und Geometriemodell in Form einer STEP-Datei und die Fertigungsmaschinenprogrammierung als G-Codes übermittelt, welche die Grundlage des Digitalen Masters liefern. Aus dem physischen Zwilling werden Sensordaten über den Digitalen Schatten an den Digitalen Zwilling kommuniziert. Für den Datentransfer wird die Technologie Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) verwendet, die auf einer Client-Server-Architektur aufbaut. Die Sensorik und der

Kommunikationsserver werden als gegeben angenommen, sodass im Digitalen Zwilling ein Client die Daten abrufen kann. Die interne und die externe Ökodatenbank werden durch einen Import von Tabellen im XLSX-Format im Assistenzsystem verfügbar gemacht. Als externe Ökodatenbank wird in dieser Dissertation ein Datensatz von ecoinvent verwendet, welcher ebenfalls im XLSX-Format vorliegt.

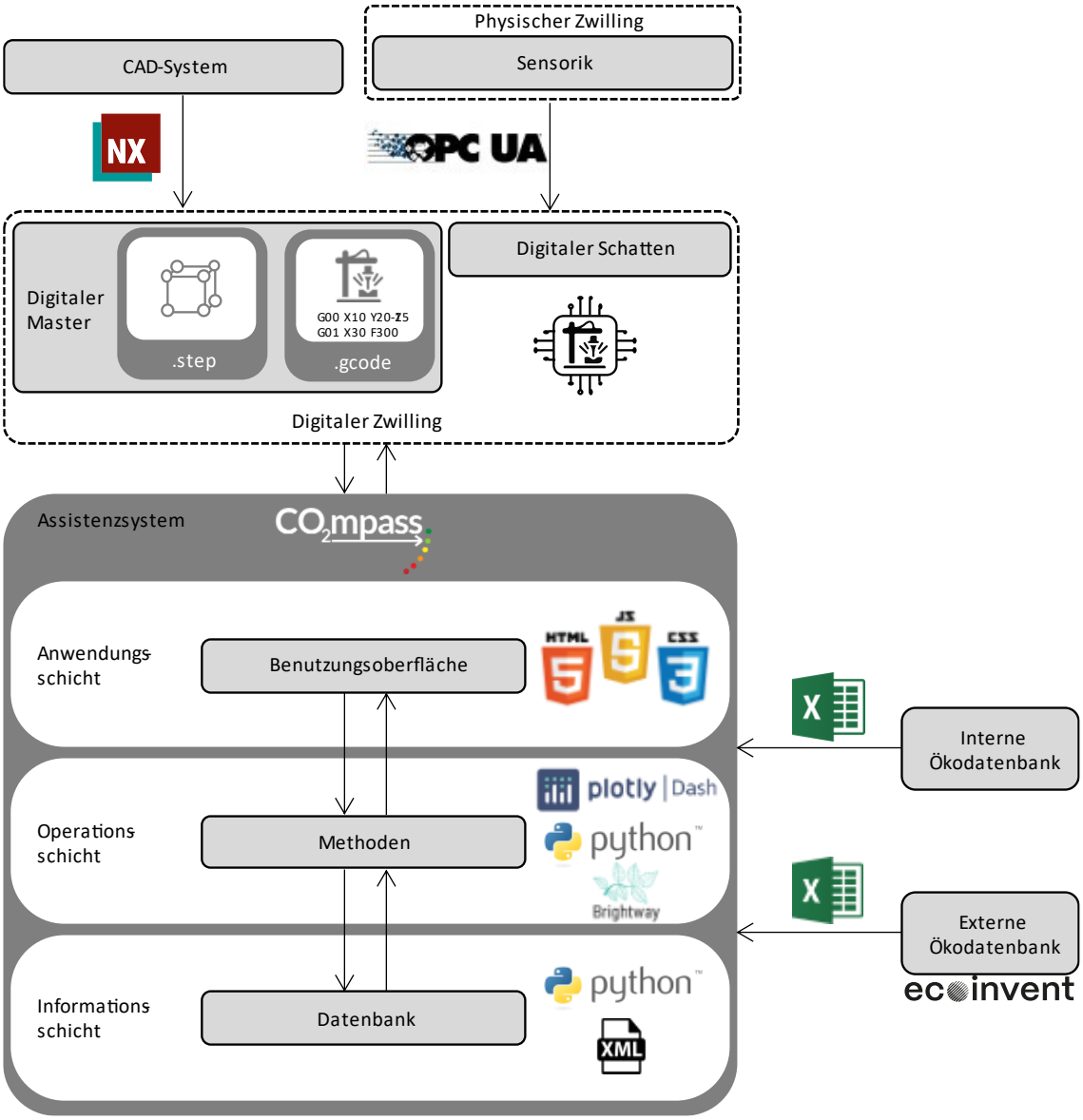


Abbildung 5-1: Implementierungsarchitektur und Technologien der prototypischen Implementierung

Als grundlegende Programmiersprache des Assistenzsystems wird python in der Version 3.11.5 verwendet. Diese wird genutzt, um die Umsetzung der Informationsschicht als Datenbank aufzusetzen. Neben der python-Datenbank werden Dateien innerhalb des Assistenzsystems im XML-Format gespeichert, um Daten und getroffene Eingaben

standardisiert für den Export bereitzustellen. In der Operationsschicht werden die Methoden mit den python-Bibliotheken plotly und brightway umgesetzt. Brightway ist ein öffentlich verfügbares Rahmenwerk für Ökobilanzen und wird genutzt, um die externe Ökodatenbank abzufragen und weitere Berechnungen wie die Unsicherheitsberechnung der externen Daten durchzuführen [253]. In der Anwendungsschicht wird die Struktur der Benutzungsoberfläche durch Hypertext Markup Language (html), die Gestaltung durch Cascading Style Sheets (css) und die Interaktivität durch JavaScript (js) realisiert. Ein Grund für die Nutzung der python-Bibliothek ist die Interaktionsmöglichkeit des Benutzers im Provenienzgraphen und im Sankeydiagramm. Die Methoden des Konzepts werden durch python implementiert. Die Visualisierung in html ermöglicht eine Nutzung der Applikation unabhängig des Endgerätes. Durch diese Art der Programmierung kann die Applikation auf einem zentralen Server laufen und ist für verschiedene Arten von Endgeräten nutzbar.

Eine Besonderheit der plotly-Bibliothek sind sogenannte Callbacks. Diese verbinden Eingabekomponenten wie Knöpfe oder Texteingaben mit Ausgabekomponenten wie Textausgaben oder Diagramme. Somit werden die linear ablaufenden Programmsegmente miteinander verknüpft. In einem Callback können auch mehrere Eingaben und Ausgaben verwendet werden. Insgesamt dienen die Callbacks dazu, die interaktiven und reaktiven Webanwendungen durch die Verbindung von Benutzereingaben mit der Aktualisierung von Ausgaben zu realisieren.

Die resultierende Benutzungsoberfläche des Assistenzsystems ist in Abbildung 5-2 dargestellt. In der Kopfzeile befindet sich auf der linken Seite ein Logo und auf der rechten Seite der Gesamt PCF des zu untersuchenden Bauteils an der Position eins. Es folgt eine Navigationsleiste mit den Punkten „Übersicht“, „Ökodaten“, „Qualität“ und „Provenienz“ an der Position zwei. An der Position drei wird die STEP-Datei in das Assistenzsystem über eine Dateiauswahl geladen. Sobald dieses importiert wird, wird ein Bild des Bauteils automatisiert erstellt und mit dem Platzhalterbild ausgetauscht. Dies geschieht durch eine Funktion, die die STEP-Datei in einem Hintergrundprozess im CAD System Siemens NX öffnet, auf eine vordefinierte Position platziert und anschließend ein Bild generiert, welches in das Assistenzsystem geladen wird.

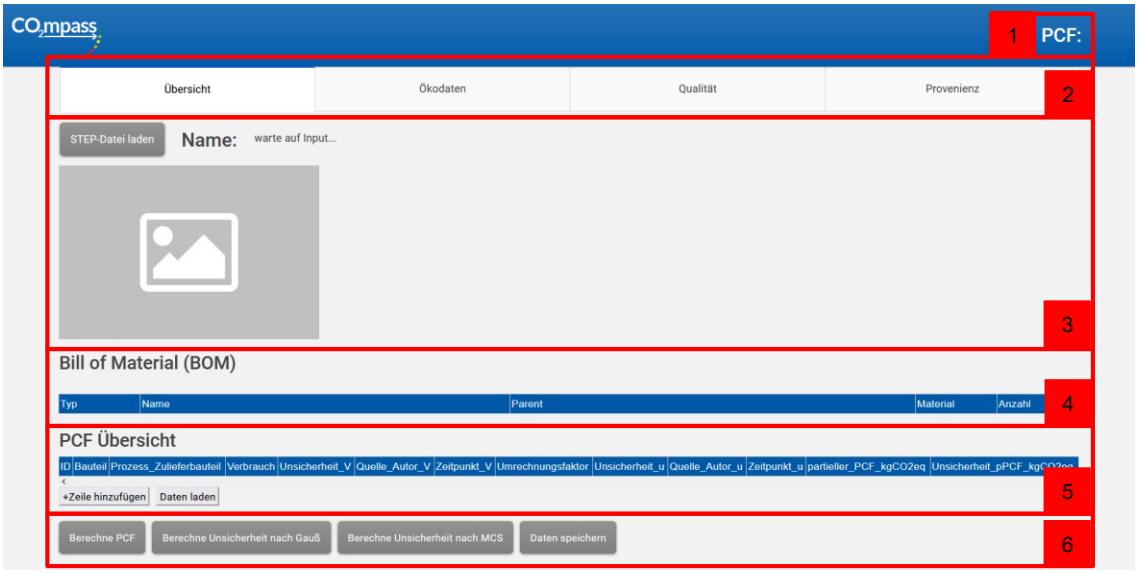


Abbildung 5-2: Übersicht der Benutzungsoberfläche des Assistenzsystems CO_2mpass

Auch der Name des Bauteils wird aus der STEP-Datei ausgelesen und an die entsprechende Stelle im Assistenzsystem eingefügt. Darüber hinaus wird die Stückliste aus dem Produktstrukturmodell automatisiert ausgelesen und tabellarisch dargestellt. Der „Typ“ beschreibt, ob es sich um eine Baugruppe oder ein Einzelteil handelt, die in der nächsten Spalte mit dem „Namen“ und dem Elternteil („Parent“) genauer beschrieben werden. Ist ein Material definiert, wird dieses unter „Material“ angeben, ebenso wie die „Anzahl“ des Bauteils. Unter der Position fünf werden Benutzereingaben zum PCF abgefragt. Es können weitere Zeilen hinzugefügt werden oder Daten aus einer XML-Datei geladen werden. Ziel ist es hier, die pPCF zu beschreiben, indem die Verbräuche und Umrechnungsfaktoren mit entsprechenden Unsicherheiten, Quellen, Autoren und der Zuordnung zu einer spezifischen Entität der STEP-Datei wie der Körperentität in die Tabelle eingetragen werden. Die Tabelle kann durch den Benutzer bearbeitet werden und dient als zentrales Element in der PCF Berechnung. Unter der Position sechs werden anschließend drei Berechnungsoperationen durchgeführt. Nach der Berechnung des Gesamt PCF aus den Einträgen der Tabelle wird die Unsicherheit mittels FFP oder der MCS ermittelt. Der Gesamt PCF ergibt sich durch die Addition der pPCF und wird unter Position eins angezeigt. Bei der Berechnung wird berücksichtigt, dass ein Bauteil mehrfach vorkommen kann, wie beispielsweise eine Schraube als Zulieferbauteil. Wird FFP als analytische Methode als Unsicherheitsberechnung gewählt, wird die Berechnung entsprechend der FFP-Formel 2-2 durchgeführt. Dazu werden die Werte der Unsicherheit der pPCF als statistisch symmetrisch angenommen.

Eine alternative Berechnung kann durch die probabilistische Methode durch eine MCS erfolgen. Hier kann eine Unsicherheitsverteilung auch in einer asymmetrischen Verteilung vorliegen. In der prototypischen Implementierung wird die MCS durch eine definierte Anzahl an zufällig generierten Werten um die Messung basierend auf den angegebenen Unsicherheiten aus der Übersichtstabelle erzeugt. Durch die Nutzung der simulierten Daten wird die Unsicherheit jeder Messung als Standardabweichung der generierten Stichprobe berechnet. Anschließend ergibt sich die Gesamtunsicherheit aus der Quadratwurzel der Summe der Quadrate der Einzelunsicherheiten. Diese wird durch ein Histogramm der simulierten Werte visualisiert. Die Anzahl der Simulationen wird auf 1000 festgelegt. Dieser Wert stellt einen Kompromiss aus Rechenaufwand und Genauigkeit dar und ist für das vorliegende Szenario ein gängiger Wert [254]. Die Daten aus der Tabelle und die berechneten Daten können im XML-Format gespeichert werden und sind somit in einem standardisierten Format für eine weitere Verarbeitung verfügbar. Durch die Zuordnung zu einer Produktentität oder einer geometriebezogenen Entität in der STEP-Datei werden die entsprechenden PCF-Werte verknüpft. Beispielsweise werden die pPCF, die zum Körper eines Bauteils gehören, addiert und dem Hash mit der Entität *manifold solid brep* zugewiesen. Anlog geschieht dies mit der Oberfläche und der Entität *closed shell*. Der Gesamt PCF des Bauteils wird mit dem Hash der Produktentität *product* verknüpft. Handelt es sich um eine Baugruppe, besitzt jedes Einzelteil und auch die Baugruppe selbst eine Produktentität. Die pPCF eines Einzelteils werden ebenfalls mit dem Hash der Produktentität über den entsprechenden Eintrag in der PCF Übersichtstabelle verbunden.

5.1.1 Datenquellen für Primär- und Sekundärdaten

Im zweiten Reiter befinden sich verschiedene Datenquellen für die Verbrauchsermittlung des Produkts. Die Benutzungsoberfläche ist in Abbildung 5-3 zu sehen. Unter der Position eins werden Maschinen gelistet, die direkt mit dem Assistenzsystem verknüpft sind. Dies erfolgt über eine OPC UA Verbindung. Ein Beispiel einer solchen Verknüpfung zeigt Abbildung 5-4.

Das Assistenzsystem zeigt die Maschine „LiBi3D“ an. Mit dieser Maschine können Primärdaten im FFF-Verfahren aufgenommen werden. Sobald der Benutzer eine Verbindung zur Maschine über den aufgebaut hat, wird ein OPC UA Client im Assistenzsystem erzeugt, der den OPC UA Server mit der definierten IP abfragt. In diesem Beispiel werden die Werte des Energieverbrauchs seit Verbindungsaufbau und der Materialverbrauch seit Verbindungsaufbau vom OPC UA Server zurückgegeben.

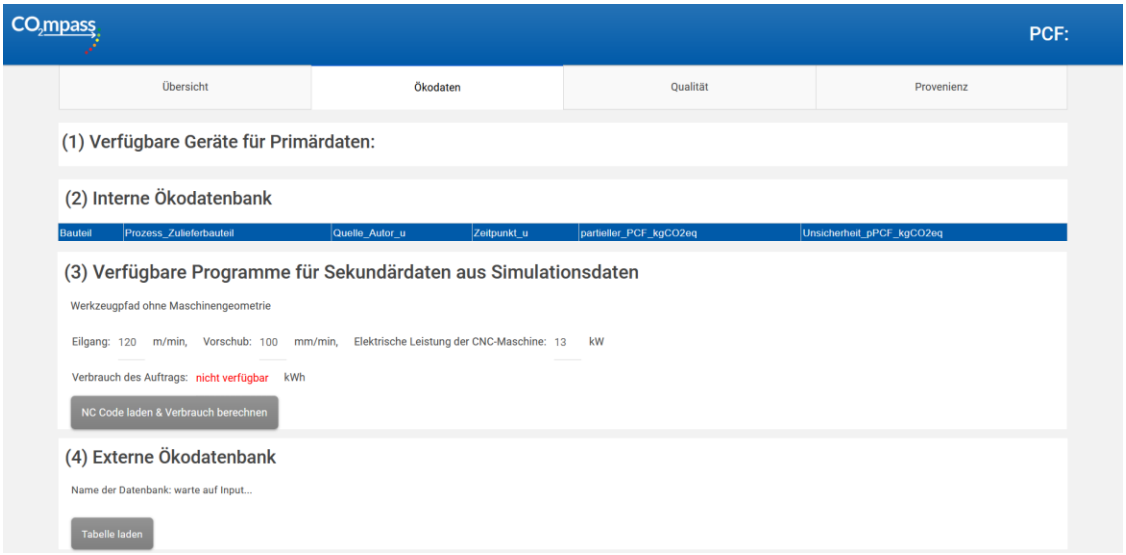


Abbildung 5-3: Datenquellen in der Benutzungsoberfläche

Abbildung 5-4: Beispiel einer Verknüpfung zwischen Assistenzsystem und Maschine

Die resultierenden Werte können als Primärdaten der Verbräuche in die PCF Übersichtstabelle übernommen werden. Unter Position zwei befindet sich eine Tabelle der internen Ökodatenbank. Diese ist mit einer XLSX-Tabelle verknüpft. Aktuell befinden sich keine Einträge in dieser Liste. An Position drei sind die verfügbaren Programme für Sekundärdaten aus Simulationsdaten zu sehen. Im Falle einer Simulation des Fertigungsprozesses einer CNC-Maschine mit Werkzeugpfad ohne Maschinengeometrie kann ein NC-Code geladen werden und somit die Verbräuche ermittelt werden. Dazu sind Informationen bezüglich der Parameter Eilgang, Vorschub und elektrischer Leistung der CNC-Maschine einzugeben. Es sind übliche Werte als Standardwerte vordefiniert. Zuletzt befindet sich unter Position vier die externe Ökodatenbank, die als XLSX-Tabelle geladen werden kann und somit direkt in der Benutzungsoberfläche verfügbar ist.

5.1.2 Bewertung der Datenqualität

Im dritten Reiter des Assistenzsystems wird die Datenqualität ermittelt. Die Benutzungsoberfläche ist in Abbildung 5-5 zu sehen:

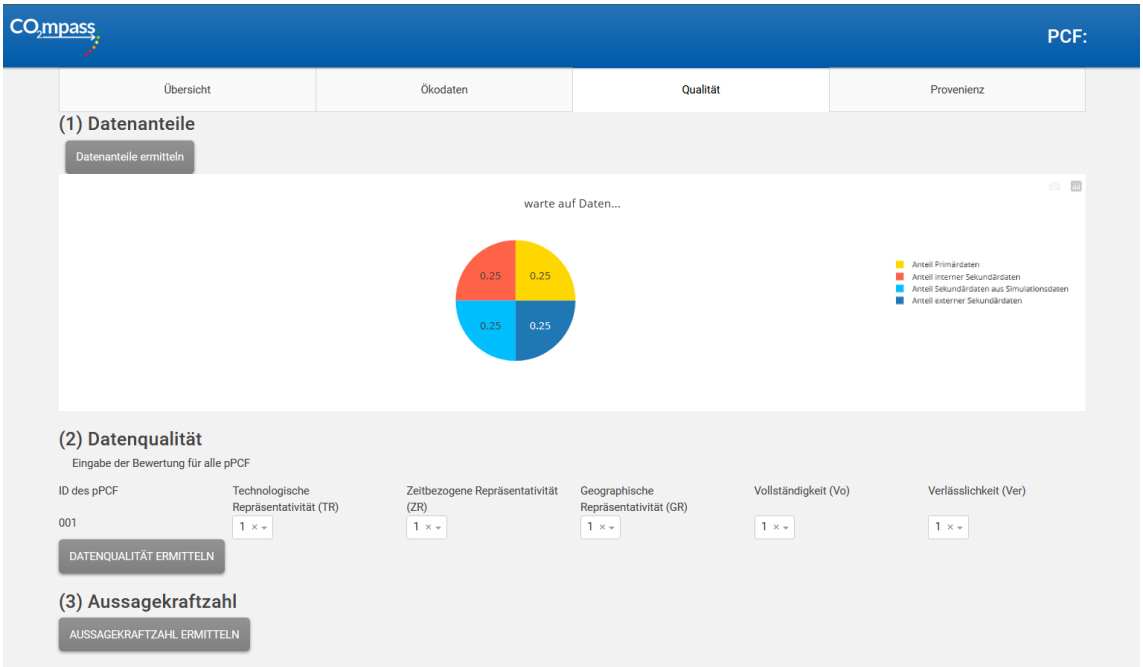


Abbildung 5-5: Datenqualitätsbewertung in der Benutzungsoberfläche

Das Verhältnis zwischen den Datenanteilen des Gesamt PCF wird im ersten Abschnitt berechnet. Es sind keine Benutzereingaben zu tätigen, da die Daten automatisiert aus der PCF Übersichtstabelle entnommen werden. Die Berechnung erfolgt mit den Formeln 4.2 bis 4.5 aus dem Partialmodell PCF Qualität. Das Ergebnis wird mittels eines Kreisdiagramms mit den Anteilen an Primärdaten, internen Sekundärdaten, Sekundärdaten aus Simulationsdaten und externen Sekundärdaten visualisiert. Außerdem werden die Ergebnisse der Berechnung in Textform unter dem Kreisdiagramm angezeigt. Als Standardwerte sind die Anteile gleichmäßig mit je 25 % verteilt, wenn noch keine Daten geladen wurden. Im zweiten Abschnitt wird die Datenqualität bestimmt. Dazu findet eine Bewertung der pPCF in fünf Kategorien durch den Anwender statt. Die Bewertung der sechsten Kategorie Unsicherheit (U) findet automatisch statt. Die fünf Kategorien lauten: Technologische Repräsentativität (TR), zeitbezogene Repräsentativität (ZR), geographische Repräsentativität (GR), Vollständigkeit (Vo) und Verlässlichkeit (Ver). Alle pPCF werden anhand der PCF Übersichtstabelle durch die Angabe der ID in einer Tabelle gelistet. Im Beispiel ist der pPCF mit der ID „001“ zu sehen. In jeder Kategorie existiert ein Dropdown-Menü mit einer Auswahlmöglichkeit der Zahlen eins bis fünf. Zur Berechnung der Datenqualität wird außerdem noch die Unsicherheit miteinbezogen, die ebenfalls direkt aus den vorhandenen Daten abgefragt wird. Sind die Werte in den Kategorien für die pPCF eingetragen, wird die Datenqualität von Primärdaten, internen Sekundärdaten, Sekundärdaten aus Simulationsdaten und externen Sekundärdaten als numerische Zahl durch die Formeln 4-8 bis 4-11 ermittelt und ausgegeben. Im dritten Abschnitt wird die

AKZ nach der Formel 4-12 berechnet. Die Voraussetzung ist eine Bestimmung der Datenanteile in Abschnitt eins und der Datenqualität in Abschnitt zwei. Außerdem wird eine erste Möglichkeit der Verbesserung der AKZ wie beispielsweise die Erhöhung des Anteils an Primärdaten vorgeschlagen.

5.1.3 Provenienz

Die Provenienz wird im vierten Reiter abgebildet. Auf der Seite der Provenienz sind im oberen Abschnitt das Sankeydiagramm und im unteren Abschnitt der PCF Provenienzgraph zu sehen. Es sind Beispieldarstellungen als Standardwerte in den Grafiken zu sehen, wie Abbildung 5-6 verdeutlicht:

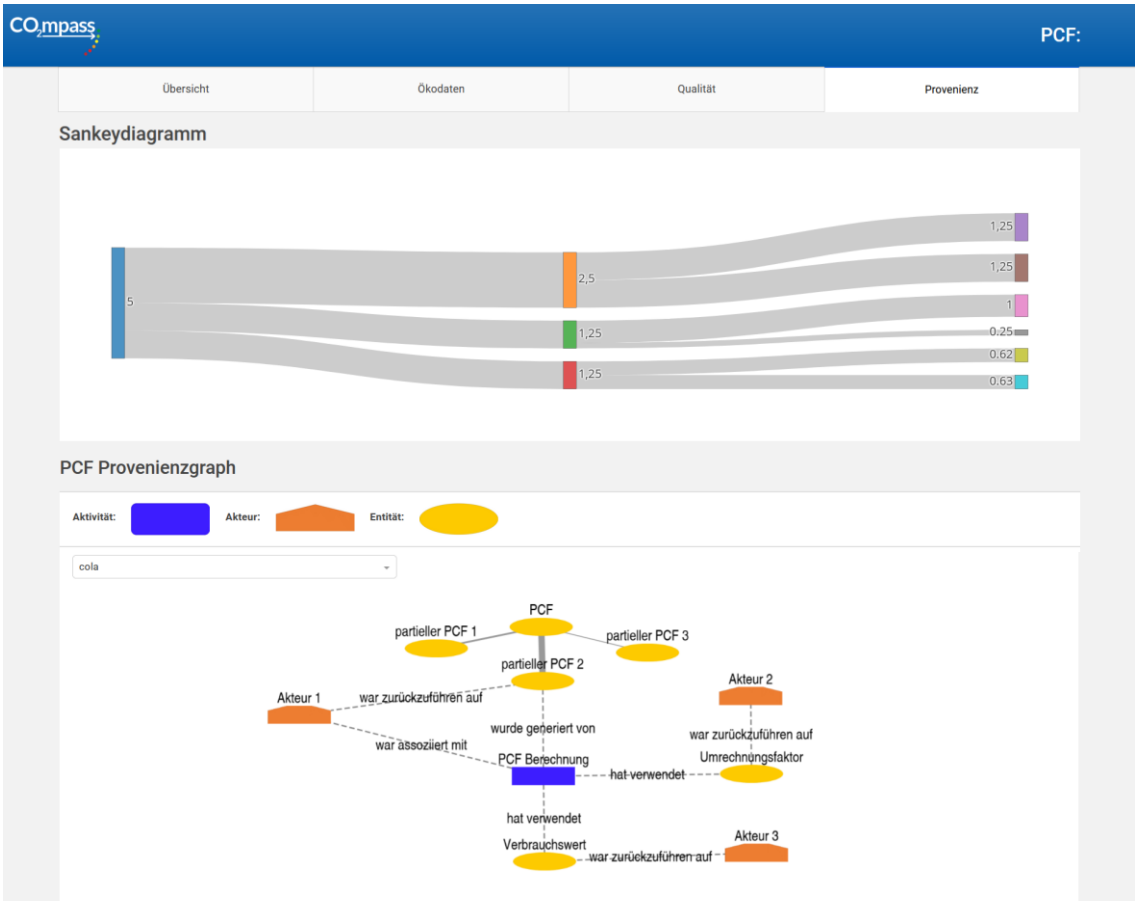


Abbildung 5-6: Provenienz in der Benutzungsoberfläche

Die Standardwerte orientieren sich an den Beispielen, die im Partialmodell PCF Provenienz im Kapitel 4.4.5 zur Erläuterung genutzt werden. Im Sankeydiagramm ist beispielsweise ein Ausgangswert von fünf zu sehen, der sich aus drei Teilen zusammensetzt. In einer weiteren Stufe ist die Zusammensetzung der Teile ebenfalls abzulesen. Der Graph kann eine beliebige Anzahl an Stufen besitzen, je nachdem wie viele Informationen über die Zusammensetzung der pPCF bekannt sind. Die Knoten repräsentieren die Werte, die in die PCF Übersichtstabelle als PCF Wert eingegeben werden. Über die Informationen,

zu welchem Bauteil und welchem Elternteil der Eintrag gehört, werden die Beziehungen zwischen den Knoten automatisch abgeleitet und entsprechend dargestellt.

Im zweiten Teil ist der PCF Provenienzgraph zu sehen. Durch die Informationserweiterung des pPCF 2 lassen sich die zugehörigen Akteure, Aktivitäten und Entitäten sowie deren Beziehungen erkennen. Außerdem ist eine Legende für Aktivitäten, Akteure und Entitäten abgebildet. Unter einem Dropdown-Menü lassen sich verschiedene Anordnungsoptionen für die Knoten und Kanten wählen.

5.2 Fazit

In diesem Kapitel wird die prototypische Implementierung des in dieser Dissertation entwickelten Konzepts in Form des Assistenzsystems CO_2mpass vorgestellt, die eine Schnittstelle zu einem Benutzer darstellt. Das Assistenzsystem beinhaltet die Umsetzung der softwaretechnischen Kernfunktionalitäten der Partialmodelle, die im Konzept darstellt wurden. Ziel ist ein funktionsfähiger Prototyp als Software mit Benutzungsoberfläche, um die Machbarkeit einer Umsetzung des entwickelten Konzepts zu demonstrieren.

Das Assistenzsystem wird mit den drei Schichten Anwendungsschicht, Operationsschicht und Informationsschicht implementiert. Dort sind eine Datenbank, die Methoden aus den Partialmodellen und die Benutzungsoberfläche umgesetzt. Das Assistenzsystem interagiert mit dem Digitalen Zwilling und besitzt Schnittstellen zu einer internen sowie externen Ökodatenbank. Über die CAD Software werden das Produktstruktur- und Geometriemodell im STEP-Format sowie die CAM-Programmierung als Digitaler Master zur Verfügung gestellt, welche im Assistenzsystem verwendet werden. Aus dem Produktstruktur- und Geometriemodell im STEP-Format werden automatisiert Daten abgeleitet, wie Name, Volumen oder Material des Bauteils. Handelt es sich um eine Baugruppe, wird die BOM aus dem Produktstrukturmodell abgeleitet. Die STEP-Datei bildet eine Grundlage, um nach der PCF Berechnung Daten miteinander zu verknüpfen. Beispielsweise wird die geometriebezogene Entität der Körper unter den STEP Hashs mit der Beschreibung *manifold solid brep* mit den pPCF verbunden, die Volumenoperationen des jeweiligen Körpers abbilden. Neben den pPCF wird der Gesamt PCF der Baugruppe oder der Einzelteile den STEP Hashs der Produktentitäten zugewiesen. Die Zuweisung findet über die PCF Übersichtstabelle statt, in der die pPCF beschrieben werden. Dort wird vom Benutzer angegeben, welchem Einzelteil und welcher Entität der pPCF zuzuordnen ist. Die Verbräuche und die Umrechnungsfaktoren, die dazu verwendet werden, um die pPCF und anschließend den Gesamt PCF zu berechnen, können aus verschiedenen Datenquellen stammen. Im Assistenzsystem sind vier Quellen für Ver-

bräuche und eine Quelle für Umrechnungsfaktoren integriert. Als erste Möglichkeit können Primärdaten von einem physischen Zwilling erhoben werden. Dazu wird exemplarisch eine OPC UA Kommunikationsstruktur mit einem eingebetteten Client im Assistenzsystem und einem Server aufgebaut, der mittels Sensorik für Verbrauchsmessungen einer Produktionsmaschine diese als Digitalen Schatten an das Assistenzsystem übermittelt. Weiterhin ist eine interne Ökodatenbank integriert, die über historische Daten von Verbrauchsmessungen im Unternehmen verfügt. Sind Daten nicht über die ersten beiden Quellen verfügbar, kann eine Verbrauchssimulation im Assistenzsystem durchgeführt werden. Beispielhaft wird ein G-Code aus dem CAD-System importiert und analysiert, um die Verbräuche einer CNC-Fertigung anzunähern. Dazu muss der Benutzer Eingaben zu Leistungswerten der Maschine tätigen. Kann keine Simulation durchgeführt werden, müssen die Verbrauchswerte aus einer externen Ökodatenbank entnommen werden. In der prototypischen Implementierung ist die Ökodatenbank ecoinvent integriert. Die Integration der externen sowie internen Ökodatenbank ist mittels XLSX-Schnittstelle realisiert.

Sind die Informationen zu den pPCF in die PCF Übersichtstabelle eingetragen, kann der Gesamt PCF inklusive Unsicherheit berechnen werden. Das Assistenzsystem bietet die Möglichkeit, die Unsicherheit sowohl mit der AM in Form einer FFP als auch mit der PM in Form einer MCS zu berechnen. Bei der MCS wird zusätzlich ein Histogramm der Unsicherheitsverteilung dargestellt.

Die Werte und Quellen der pPCF aus der PCF Übersichtstabelle werden in einem weiteren Schritt auf ihre Qualität in einem getrennten Abschnitt des Assistenzsystems bewertet. Auf die Darstellung der anteiligen Verteilung der Quellen aus Primärdaten, internen Sekundärdaten, Sekundärdaten aus Simulationsdaten sowie externen Sekundärdaten am Gesamt PCF folgt die Bewertung der pPCF über sechs Kategorien. Über ein Auswahlmenü werden Zahlen von eins bis fünf in den Katorgien vergeben. Anschließend werden die DQI der pPCF berechnet. Als letzter Schritt im Qualitätsmanagement des PCF wird die AKZ ermittelt und ein Vorschlag gegeben, wie die Qualität des PCF erhöht werden kann.

Das Assistenzsystem verfügt darüber hinaus über die Möglichkeit der Informationsdarstellung mittels Sankeydiagramm und Provenienzgraph, die im letzten Reiter des Programms zu finden sind. Hierüber lassen sich die Beziehungen zwischen den pPCF und die verantwortlichen Quellen analysieren, indem eine Interaktion zwischen Benutzer und den Graphen ermöglicht wird.

Das Assistenzsystem CO_2mpass stellt eine prototypische Implementierung des Konzepts zur Integration des CO_2-Fußabdrucks von Produkten in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling dar und bereitet die Grundlage zur Validierung und Verifikation des Konzepts. Im folgenden Kapitel wird ein repräsentativer Anwendungsfalls ausgewählt, um die Validierung und Verifikation mittels des in diesem Kapitel vorgestellten Assistenzsystems durchzuführen.

6 Validierung und Verifikation

Das Konzept zur Integration des CO_2-Fußabdrucks in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling wird in diesem Kapitel anhand eines repräsentativen Beispiels validiert und anschließend verifiziert. Die Validierung dient zur Bestätigung der Erfüllung der Funktionalität für eine spezifisch beabsichtigte Anwendung durch die Bereitstellung eines objektiven Nachweises [145]. Somit kann der Nutzen des Konzepts überprüft und demonstriert werden. Die Verifikation stellt eine formale Überprüfung der Anforderungen aus Kapitel 3.4 dar. Die Anforderungen werden auf ihre Erfüllung anhand des Anwendungsfalls untersucht.

6.1 Repräsentatives Anwendungsbeispiel

Das repräsentative Anwendungsbeispiel bildet die Grundlage der Validierung und der Verifikation und wird in diesem Kapitel vorgestellt. Ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl des repräsentativen Anwendungsbeispiels ist es, dass eine Vielzahl an Quellen der pPCF vertreten ist. Dies ermöglicht, dass mehrere in der Industrie genutzte Szenarien repräsentiert werden. Das Anwendungsbeispiel ist eine Baugruppe bestehend aus vier Einzelteilen mit verschiedenem Herstellungsverfahren und Ursprung. Die Baugruppe Stiftehalter ist eine adaptierte Variante eines Beispielbauteils, welches im Rahmen des Forschungsprojekts DiNaPro in den Lernfabriken der TU Darmstadt gefertigt wurde. Das Oberteil ist ein gefrästes Bauteil aus Aluminium, welches charakterisiert ist durch drei Bohrungen für die Halterung von Stiften am Arbeitsplatz. Die Unterseite dient als Stand und wird mit einem FFF-Verfahren produziert. Die beiden Teile werden durch zwei Schrauben miteinander verbunden, die als Zulieferteile eingekauft werden. Das Beispielbauteil bildet einen industrienahen Anwendungsfall ab, indem verschiedene Standorte der Produktion inklusive des Falls der externen Zulieferung und den damit verfügbaren Informationen eingebunden werden. Die sich ergebene Stückliste ist in der Tabelle 6-1 zu sehen. Es folgt die zugehörige Darstellung des Bauteils in Abbildung 6-1.

Tabelle 6-1: Stückliste des Anwendungsbeispiels Stiftehalter

Stückliste: Stiftehalter		
Position	**Anzahl**	**Benennung**
1	1	Oberteil
2	1	Unterteil
3	2	Zylinderkopfschraube

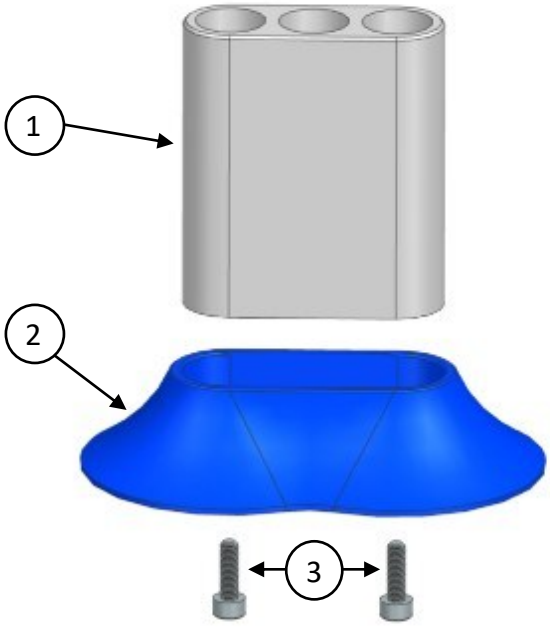
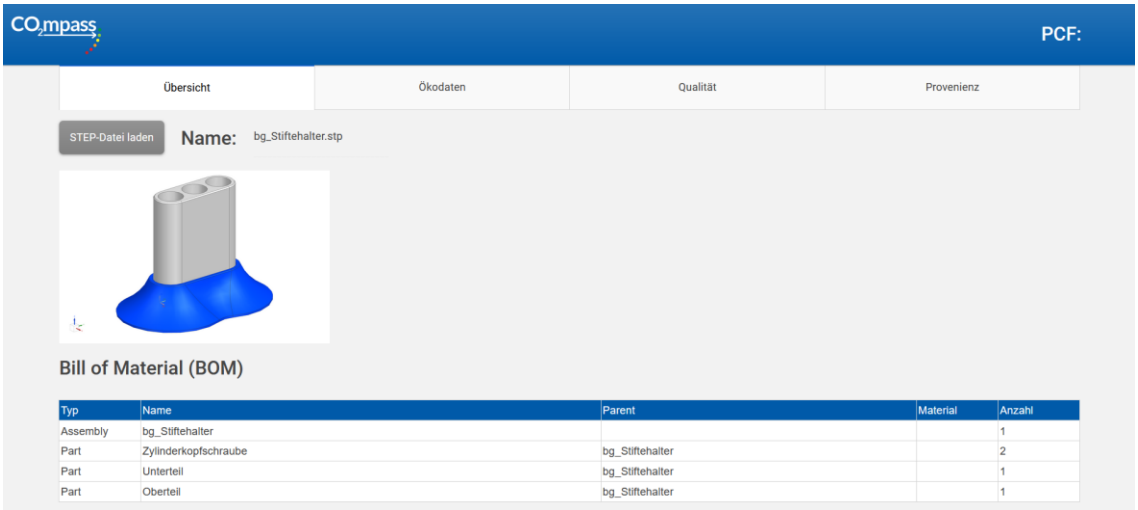


Abbildung 6-1: Visualisierung des Beispielbauteils Stiftehalter mit Positionierung der Einzelteile: (1) Oberteil, (2) Unterteil und (3) Zylinderkopfschraube

6.2 Durchführung der Validierung

Zur Durchführung der Validierung wird das Assistenzsystem CO_2mpass genutzt, welches im Kapitel 5 prototypisch implementiert wurde, und die Baugruppe Stiftehalter innerhalb des Assistenzsystems untersucht. Die Ausgangslage bildet das Produktstruktur- und Geometriemodell der Baugruppe, welches als STEP-Datei (p21-Datei) im AP 242 aus der CAD Software Siemens NX exportiert wurde. Die p21-Datei wird in das Assistenzsystem über die Eingabe „STEP-Datei laden“ überführt. Es wird der Name des Bauteils, eine Visualisierung aus der CAD Software und die Stückliste automatisch ermittelt und im Assistenzsystem dargestellt. Diese Darstellung ist in der Abbildung 6-2 zu sehen.



Typ	Name	Parent	Material	Anzahl
Assembly	bg_Stiftehalter			1
Part	Zylinderkopfschraube	bg_Stiftehalter		2
Part	Unterteil	bg_Stiftehalter		1
Part	Oberteil	bg_Stiftehalter		1

Abbildung 6-2: Automatisierte Ableitung und Darstellung von Namen, Stückliste und Visualisierung aus der STEP-Datei im Assistenzsystem

In der Stückliste sind neben den Namen der Bauteile auch der Typ, Elternteil (engl. *parent*), Material und Anzahl aufgeführt. Das Bauteil bg_Stiftehalter ist eine Baugruppe (engl. *assembly*), besitzt kein Material und kein Elternteil. Alle weiteren Bauteile sind Einzelteile (engl. *part*) und besitzen als Elternteil die Baugruppe bg_Stiftehalter. Unterteil und Oberteil kommen einmal vor. Die Zylinderkopfschraube kommt zweimal vor. In keinem Fall wurde im CAD-System ein Material zugewiesen.

Als nächster Schritt ist die PCF Übersichtstabelle zu befüllen. Zur erleichterten Nachvollziehbarkeit wird die Reihenfolge der Einträge nach der Stückliste gewählt. Das Oberteil wird mittels Fräsen hergestellt und besteht aus vier Einträgen. Der erste Eintrag ist das Rohmaterial und ein Zulieferbauteil. Der PCF wird anhand des Gewichts (Verbrauch) und Umrechnungsfaktor bestimmt. Da das Oberteil in dieser Form nicht als physisches Objekt vorliegt, können keine Gewichtsdaten als Primärdaten aufgenommen werden. Aus dem Geometriemodell (Digitaler Master) wird der Grundkörper aus dem umhüllenden Quader mit 5 mm Abstand in jede Richtung erzeugt. Über die Vermessung des Körpers und der Zuweisung der gängigen Aluminium-Magnesium-Legierungen von AlMg3 wird das Gewicht berechnet. Die Unsicherheit erfolgt durch Schätzung von 10 %, da es keine Auskunft über die spätere Größe des Zulieferbauteils gibt. Der Umrechnungsfaktor ergibt sich durch eine Ökobilanz zur Herstellung von AlMg3 in der Ökodatenbank ecoinvent 3.9.1. Ein Auszug aus der Ökodatenbank im Assistenzsystem ist in Abbildung 6-3 zu sehen:

(4) Externe Ökodatenbank

Name der Datenbank: ecoinvent 3.9.1 Cutt-Off

Tabelle laden

Activity Name	Geography	Reference Product Name	Reference Produkt Unit	IPCC 2021 no LT
				climate change no LT
				global temperature change potential (GTP100) no LT
Activity Name	Geography	Reference Product Name	Reference Product Unit	kg CO2-Eq
1,1-difluoroethane production, HFC-152a	RoW	1,1-difluoroethane, HFC-152a	kg	4.225646250367388
1,1-difluoroethane production, HFC-152a	US	1,1-difluoroethane, HFC-152a	kg	4.193071751101416
1,1-dimethylcyclopentane to generic market for solvent	GLO	solvent, organic	kg	0.9843899514921585
1-methoxy-2-propanol production	GLO	1-methoxy-2-propanol	kg	3.575930193835505
1-methylcyclopropene production	GLO	1-methylcyclopropene	kg	7.762547583989539

Abbildung 6-3: Auszug des Imports einer externen Ökodatenbank im Assistenzsystem

In der externen Ökodatenbank wurde ein GWP von 100 der Methode IPCC 2021 und als Wirkungskategorie „klimawandel“ gewählt. Die Ergebnisse sind in der Einheit kg CO_2eq vorhanden. Um die Unsicherheit zu ermitteln, wird eine MCS im integrierten brightway LCA-Modul über 1000 Schritte durchgeführt und damit der Mittelwert sowie die Standardabweichung des Mittelwerts bestimmt. In diesem Fall ist das Ergebnis des Mittelwerts mit 8,2 kg CO_2eq pro kg Aluminium deutlich höher als der deterministische Wert der Datenbank mit 7,6 kg CO_2eq pro kg Aluminium. Die Autoren der Ökodatenbank weisen darauf hin, dass der deterministisch bestimmte Wert zuverlässiger ist als der probabilistisch bestimmte Wert, der oftmals auf grob geschätzten Verteilungsparametern basiert [250]. Daher wird der deterministische Wert mit der Unsicherheit der MCS kombiniert. Der zweite Eintrag behandelt den Fräsvorgang. Da keine Primärdaten von Maschinen verfügbar sind, wird eine Simulation des Fertigungsprozesses durchgeführt. Durch Laden des G-Codes wird der Verbrauch einer CNC-Maschine durch das Abfahren eines Werkzeugpfads simuliert. Da auch hier keine Informationen über die Genauigkeit der Simulation vorliegen, wird eine Unsicherheit von 10 % geschätzt. Der Umrechnungsfaktor für Energie wird aus einem Bericht des Umweltbundesamts für den Energiemix in Deutschland von 2022 entnommen [255]. Da keine Angaben über die Unsicherheit des Wertes im Bericht gegeben sind, wird eine Unsicherheit von 3,62 % angenommen, die sich aus dem Nationalen Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasgesamtinventar ohne den Bereich der Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft ergibt [256]. Es folgen zwei Einträge zum Härten und Lasergravieren des Oberteils. Für diese liegen Einträge in einer internen Ökodatenbank im XLSX-Format vor und können übernommen werden. Die interne Datenbank im Assistenzsystem, welche durch einen Import integriert wird, ist in Abbildung 6-4 zu sehen:

1

(2) Interne Ökodatenbank

Name	Bauteil	partieller_PCF_kgCO2eq	Unsicherheit_pPCF_kgCO2eq	Zeitpunkt	Autor	Verbrauch	Unsicherheit_V	Quelle_Autor_V	Zeitpunkt_V
Härten	Oberteil V1	1.683	0.06	2024-06-26T00:00:00	N. Quernheim				
Lasergravur	Oberteil V1	0.06	0.004	2024-06-26T00:00:00	L. Arnemann	0.12 kWh	0.00kWh		

2

(2) Interne Ökodatenbank

Zeitpunkt	Autor	Verbrauch	Unsicherheit_V	Quelle_Autor_V	Zeitpunkt_V	Umrechnungsfaktor	Unsicherheit_u	Quelle_Autor_u	Zeitpunkt_u
2024-06-26T00:00:00	N. Quernheim								
2024-06-26T00:00:00	L. Arnemann	0.12 kWh	0.00kWh			0.498 kg CO2eq/kWh	0.016683 kg CO2eq/kWh	Umweltbundesamt	2023

Abbildung 6-4: Import der internen Datenbank im Assistenzsystem: (1) linke Tabellenhälfte, (2) rechte Tabellenhälfte

Für das Härten liegt ein Wert des pPCF inklusive Unsicherheit vor, allerdings keine weiteren Werte wie ein Verbrauchswert. Beim Lasergravieren ist der Verbrauchswert der Maschine vorhanden und somit kann über den bereits bekannten Umrechnungsfaktor für Energie der pPCF ermittelt werden.

An Position fünf und sechs sind Informationen über die pPCF des Unterteils eingetragen. Das Bauteil ist ein additiv gefertigtes Bauteil im FFF-Verfahren. Über die Schnittstelle zum Gerät „LiBi3D“ können Primärdaten für Filament- und Energieverbrauch direkt im Assistenzsystem erhoben werden. Die Unsicherheitsberechnung im FFF-Verfahren erfolgt durch eine Kombination aus MCS und FFP, die unter der Erstautorenschaft des Autors dieser Dissertation bereits veröffentlicht wurde [257].

Im letzten Eintrag werden die Informationen über die beiden Zylinderkopfschrauben beschrieben. Diese sind Zulieferteile und es soll mit diesem Beispiel der Fall abgedeckt werden, dass unvollständige Informationen vom Zulieferer übersendet werden. Die Information über die Unsicherheit muss vom Benutzer selbstständig ermittelt werden. Es wird eine vergleichsweise hohe Unsicherheit von 100 % angesetzt, da keine Informationen zur Art und Weise der PCF Berechnung vorliegen wie dem GWP, der Berechnungsmethode oder den gesetzten Rahmenbedingungen.

Alle Einträge werden den Produktentitäten oder geometriebezogenen Entitäten der STEP-Datei zugeordnet. Unter den geometriebezogenen Entitäten wird zwischen Körper Oberteil, Oberfläche Oberteil und Körper Unterteil differenziert. Ein Eintrag wird direkt der Produktentität bg_Stiftehalter zugewiesen. In der Abbildung 6-5 ist die Tabelle zu sehen:

1

PCF Übersicht

PCF_ID	Name	Bauteil	partieller_PCF_kgCO2eq	Unsicherheit_pPCF_kgCO2eq	Zeitpunkt	Autor	Zulieferteil	Zugehoerigkeit_Entitaet	Verbrauch	Unsicherheit_V	Quelle_A
001	Rohmaterial	Oberteil	1.858	0.311	27.06.2024	S. Winter	ja	Körper Oberteil	0.2241 kg	0.02241 kg	DZ
002	Fräsen (Simulation)	Oberteil	0.279	0.029	18.05.2024	DZ	nein	Körper Oberteil	0.56 kWh	0.056 kWh	DZ
003	Härten	Oberteil	1.683	0.060	26.06.2024	N. Quernheim	nein	Oberfläche Oberteil			
004	Lasergravur	Oberteil	0.060	0.004	26.06.2024	L. Arnemann	nein	Oberfläche Oberteil	0.12 kWh	0.006 kWh	
005	Material (PLA)	Unterteil	0.079	0.011	02.05.2024	DZ	nein	Körper Unterteil	0.01377 kg	0.00016 kg	DZ
006	Energie	Unterteil	0.144	0.006	02.05.2024	DZ	nein	Körper Unterteil	0.2889 kWh	0.0067 kWh	DZ
007	ZKS M3x10	Zylinderkopfschraube	0.001	0.001	2023	Schraubenfirma	ja	bg_Stiftehalter			

+Zeile hinzufügen Daten laden

2

PCF Übersicht

Zeitpunkt	Autor	Zulieferteil	Zugehoerigkeit_Entitaet	Verbrauch	Unsicherheit_V	Quelle_Autor_V	Zeitpunkt_V	Umrechnungsfaktor	Unsicherheit_u	Quelle_Autor_u	Zeitpunkt_u
27.06.2024	S. Winter	ja	Körper Oberteil	0.2241 kg	0.02241 kg	DZ	27.06.2024	7.591 kg CO2eq/kg ALU	1.163633 kg CO2eq/kg	G. Bourgault (ecoinvent)	2011
18.05.2024	DZ	nein	Körper Oberteil	0.56 kWh	0.056 kWh	DZ	02.05.2024	0.498 kg CO2eq/kWh	0.016683 kg CO2eq/kWh	Umweltbundesamt	2023
26.06.2024	N. Quernheim	nein	Oberfläche Oberteil								
26.06.2024	L. Arnemann	nein	Oberfläche Oberteil	0.12 kWh	0.006 kWh			0.498 kg CO2eq/kWh	0.016683 kg CO2eq/kWh	Umweltbundesamt	2023
02.05.2024	DZ	nein	Körper Unterteil	0.01377 kg	0.00016 kg	DZ	02.05.2024	5.77 kg CO2eq/kg PLA	0.798 kg CO2eq/kg PLA	M. Tichá, J. O. Osterod	2022
02.05.2024	DZ	nein	Körper Unterteil	0.2889 kWh	0.0067 kWh	DZ	02.05.2024	0.498 kg CO2eq/kWh	0.016683 kg CO2eq/kWh	Umweltbundesamt	2023
2023	Schraubenfirma	ja	bg_Stiftehalter								

+Zeile hinzufügen Daten laden

Abbildung 6-5: PCF Übersichtstabelle der Baugruppe Stiftehalter: (1) linke Tabellenhälfte, (2) rechte Tabellenhälfte

Wird die Funktion „Berechne PCF“ ausgeführt, ergibt sich ein Gesamt PCF von 4,105 kg CO_2eq für den Stiftehalter, welcher in der oberen rechten Ecke des Assistenzsystems angezeigt wird. Die absoluten Werte der Unsicherheit sind nach der Berechnungsmethode FFP 0,318 kg CO_2eq und nach MCS mit 1000 Schritten 0,321 kg CO_2eq. Es werden beide Berechnungsmethoden durchgeführt, da die Voraussetzungen weder für die PM noch für die AM gegeben sind. Das liegt beispielsweise daran, dass die partiellen Unsicherheiten größer als die festgelegte Grenze der PM sind (Quotient aus Dividend Standardabweichung und dem Divisor Mittelwert muss kleiner als 0,3 sein) oder die Unsicherheiten asymmetrische Verteilungen aufweisen. Ein asymmetrisches Verhalten zeigt sich auch in der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Gesamt PCF, die aus der MCS erzeugt werden kann. Für die Darstellung des Histogramms wurde eine Anzahl an 30 Blöcken gewählt, in denen die Wahrscheinlichkeiten zusammengefasst werden. Die Ergebnisse und das Histogramm sind in Abbildung 6-6 zu sehen:

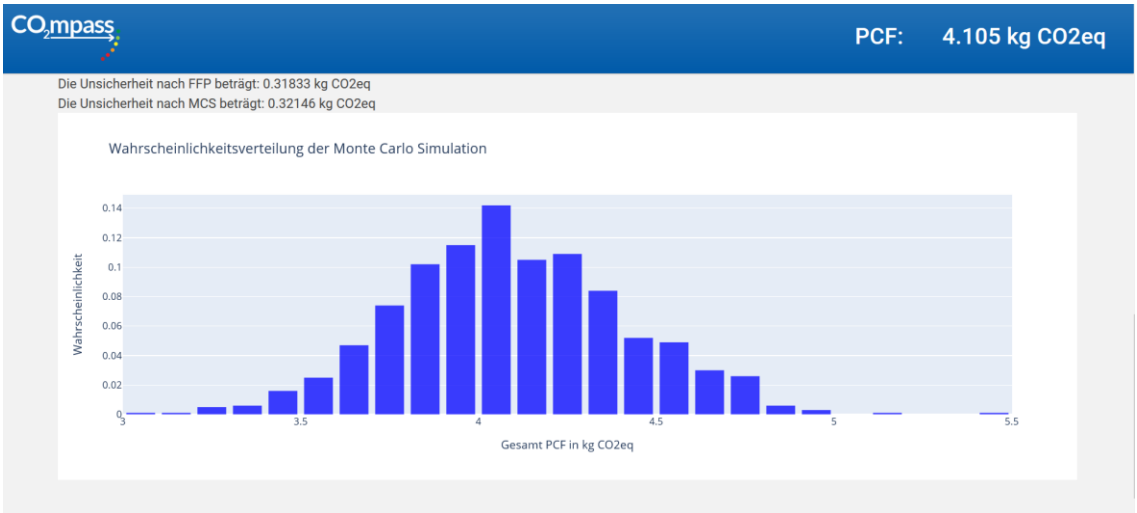


Abbildung 6-6: Ergebnisse des Gesamt PCF, der Unsicherheitsberechnung nach FFP und MCS sowie die Wahrscheinlichkeitsverteilung der MCS als Histogramm

Nach der Berechnung des PCF und der Unsicherheit wird die Datenqualität untersucht. Zunächst können die Datenanteile automatisiert ermittelt werden. Es ergibt sich das Kreisdiagramm in Abbildung 6-7:

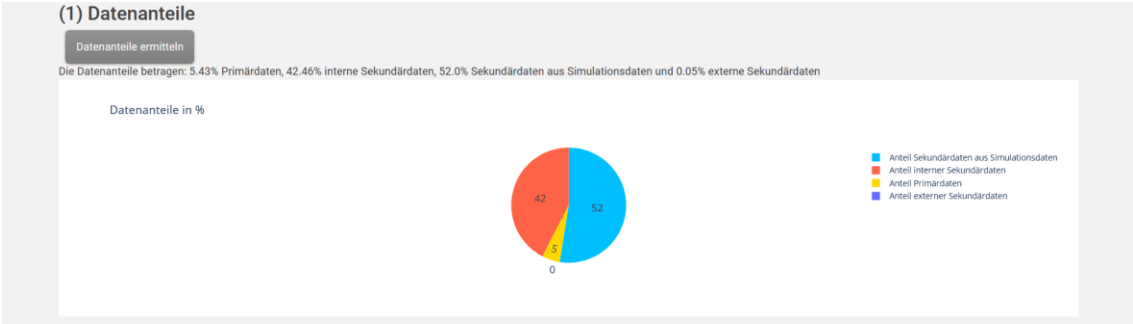
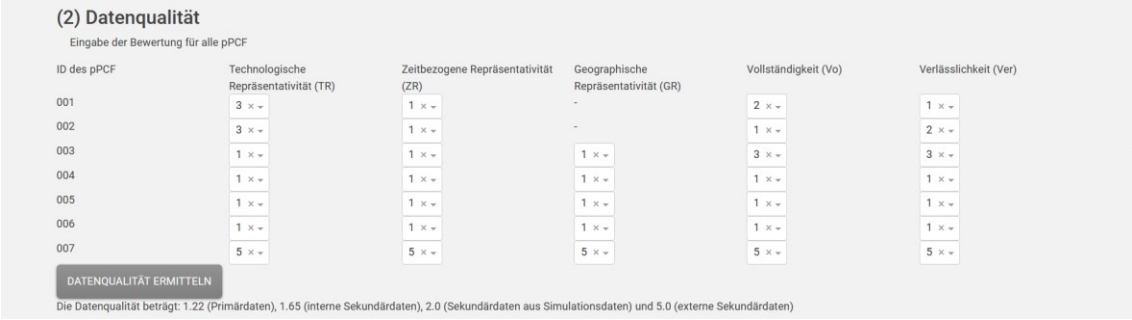


Abbildung 6-7: Ergebnis der Berechnung der Datenanteile als Kreisdiagramm im Assistenzsystem

Die Datenanteile teilen sich auf 5,43 % Primärdaten (gelb), 42,46 % interne Sekundärdaten (rot), 52,0 % Sekundärdaten aus Simulationsdaten (blau) und 0,05 % externe Sekundärdaten (lila) auf. Es folgt die Eingabe der Bewertungskriterien für die pPCF wie es in der Abbildung 6-8 zu sehen ist. Für die Sekundärdaten aus Simulationsdaten wird kein GR eingetragen. Die Bewertungen von eins bis fünf in jeder Kategorie erfolgen durch den Abgleich mit den Tabellen im Partialmodell PCF Qualität.



(2) Datenqualität

Eingabe der Bewertung für alle pPCF

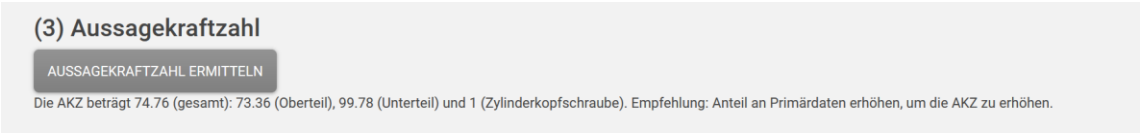
ID des pPCF	Technologische Repräsentativität (TR)	Zeitbezogene Repräsentativität (ZR)	Geographische Repräsentativität (GR)	Vollständigkeit (Vo)	Verlässlichkeit (Ver)
001	3	1	-	2	1
002	3	1	-	1	2
003	1	1	1	3	3
004	1	1	1	1	1
005	1	1	1	1	1
006	1	1	1	1	1
007	5	5	5	5	5

DATENQUALITÄT ERMITTELN

Die Datenqualität beträgt: 1.22 (Primärdaten), 1.65 (interne Sekundärdaten), 2.0 (Sekundärdaten aus Simulationsdaten) und 5.0 (externe Sekundärdaten)

Abbildung 6-8: Eingabe der Bewertungskriterien für die pPCF und Ergebnis der Datenqualitätsberechnung im Assistenzsystem

Das Ergebnis der Datenqualität ist 1,22 für Primärdaten, 1,65 für interne Sekundärdaten, 2,0 für Sekundärdaten aus Simulationsdaten und 5,0 für externe Sekundärdaten. Die prozentualen Unsicherheitswerte werden aus der PCF Übersichtstabelle ermittelt und fließen in die Bewertung mit ein. Primärdaten werden ausschließlich im Unterteil verwendet (ID 005, 006). Das Oberteil besteht aus einem Mix aus Sekundärdaten aus Simulationsdaten (ID 001, 002) und internen Sekundärdaten (ID 003, 004). Die Zylinderkopfschraube ist ein externer Sekundärdatensatz (ID 007). Im Anschluss wird die AKZ ermittelt, wie es in Abbildung 6-9 zu sehen ist:



(3) Aussagekraftzahl

AUSSAGEKRAFTZAHL ERMITTELN

Die AKZ beträgt 74.76 (gesamt): 73.36 (Oberteil), 99.78 (Unterteil) und 1 (Zylinderkopfschraube). Empfehlung: Anteil an Primärdaten erhöhen, um die AKZ zu erhöhen.

Abbildung 6-9: Ergebnis der Berechnung der AKZ im Assistenzsystem

Die AKZ des Stiftehalters ist 74,76. Darüber hinaus sind die AKZ der Einzelteile mit 73,36 für das Oberteil, 99,78 für das Unterteil und 1 für die Zylinderkopfschraube angeben. Auffallend ist der nahezu ideale Wert des Unterteils (~100) und der Minimalwert der Zylinderkopfschraube (1). Der Minimalwert der Zylinderkopfschraube ist auf die Informationslücken des pPCF zurückzuführen. Der prozentuale Anteil des pPCF der beiden Zylinderkopfschrauben ist im Vergleich zum Gesamt PCF 0,05 %. Der Einfluss des AKZ der Zylinderkopfschrauben ist somit in der AKZ des Stiftehalters nicht bemerkbar. Das Assistenzsystem gibt eine Empfehlung zur Erhöhung der AKZ ab, indem mehr Primärdaten gemessen werden sollten, da der Anteil mit 5,43 % als gering eingestuft wird.

Im vierten Reiter werden das Sankeydiagramm und der Provenienzgraph abgebildet. Das Sankeydiagramm des Stiftehalters ist in Abbildung 6-10 zu sehen:

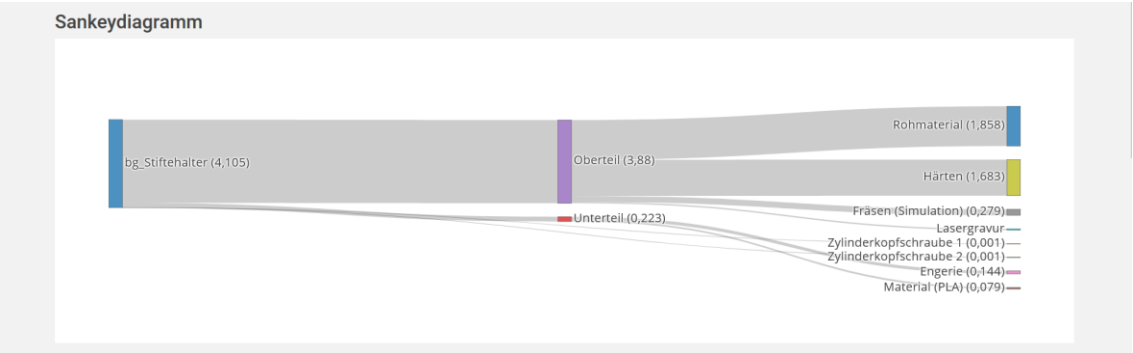


Abbildung 6-10: PCF Sankeydiagramm der Baugruppe Stiftehalter im Assistenzsystem. Alle Werte in kg CO_2eq

Das Sankeydiagramm zeigt, dass das Oberteil den größten Anteil am Gesamt PCF besitzt. Das Oberteil kann in die beiden Hauptverursacher Rohmaterial und Härten aufgeteilt werden. Fräsen (Simulation) und Lasergravur sind im Vergleich deutlich geringer. Das Unterteil speist sich aus Material (PLA) und Energie. Dabei hat die Energie einen größeren Anteil als das Material. Die Zylinderkopfschrauben sind aufgrund des geringen PCF optisch kaum noch zu erkennen. Unterhalb des Sankeydiagramm wird der Provenienzgraph abgebildet. Die erste Stufte ist in Abbildung 6-11 zu:

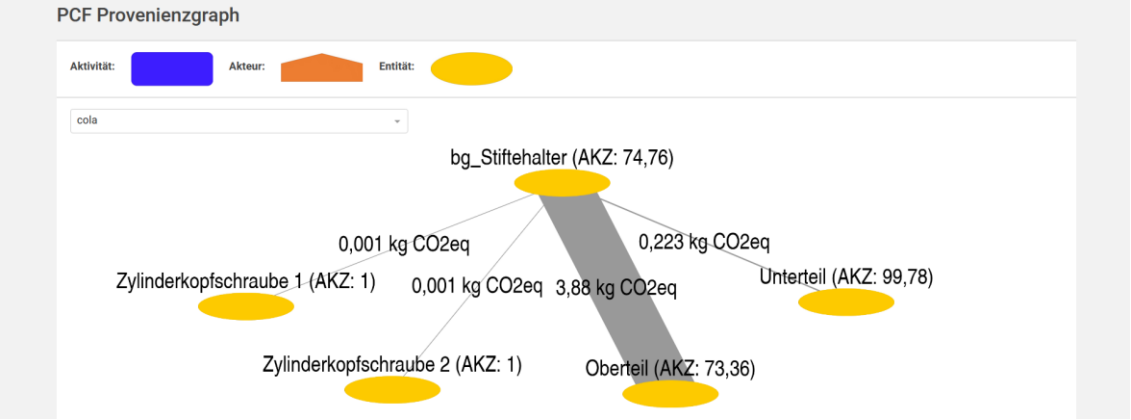


Abbildung 6-11: Stufe eins des PCF Provenienzgraph der Baugruppe Stiftehalter im Assistenzsystem

In der ersten Stufe wird die Baugruppe mit den Einzelteilen als Entitäten und deren PCF sowie AKZ abgebildet. Dabei ist das Verhältnis der Pfeilstärken gleich dem Verhältnis der PCF der Einzelteile. Das Oberteil besitzt den größten Anteil am Gesamt PCF des Stiftehalters. Durch einen Klick auf eine Entität wird der Graph erweitert. Dies ist am Beispiel des Unterteils in der Abbildung 6-12 zu sehen:

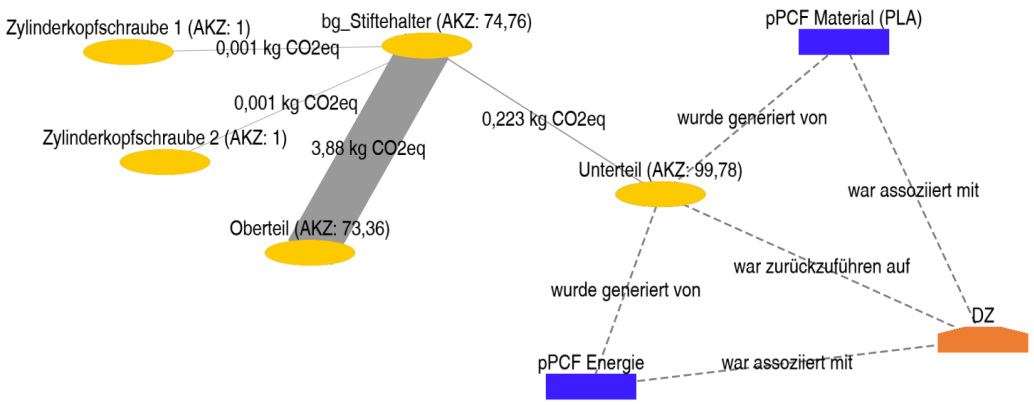


Abbildung 6-12: Stufe zwei des PCF Provenienzgraph der Baugruppe Stiftehalter im Assistenzsystem: Informationserweiterung des Einzelteils Unterteil

Der PCF des Unterteils setzt sich zusammen aus den pPCF für Material (PLA) und Energie, die als Aktivitäten dargestellt sind. Der assoziierte Akteur der beiden Aktivitäten ist der Digitale Zwilling, der als Quelle des PCF des Einzelteils eine direkte Verbindung zur Entität Unterteil besitzt. In einer weiteren Stufe sind die Aktivitäten erweiterbar, was am Beispiel des pPCF der Energie in Abbildung 6-13 zu sehen ist:

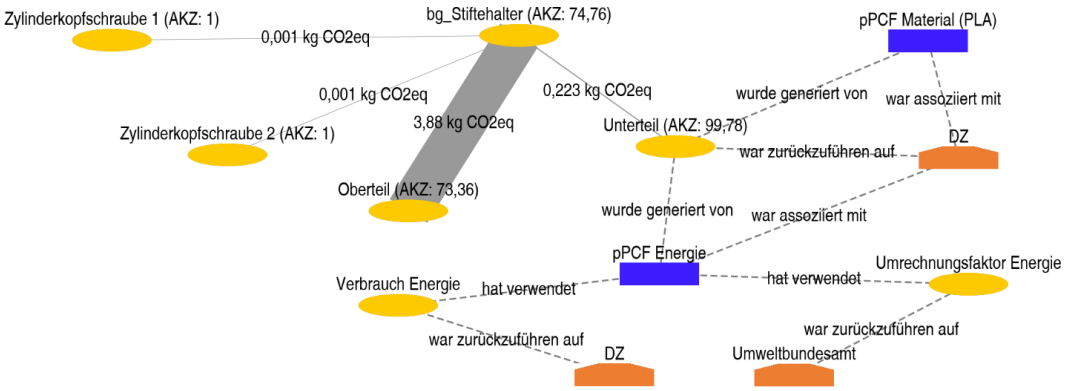


Abbildung 6-13: Stufe drei des PCF Provenienzgraph der Baugruppe Stiftehalter im Assistenzsystem: Informationserweiterung des Energieverbrauchs des Einzelteils Unterteil

Der pPCF der Energie wird durch die beiden Entitäten Verbrauch Energie und Umrechnungsfaktor Energie berechnet. Im Fall des Verbrauchs ist der Akteur, der die Werte bereitgestellt hat, der Digitale Zwilling. Der Umrechnungsfaktor der Energie ist zurückzuführen auf eine Quelle des Umweltbundesamts [255]. Mit dem Provenienzgraph kann eine Analyse durchgeführt werden, um Informationslücken zu finden. Im Fall des Stiftehalters wurde beispielsweise erkannt, dass kein verantwortlicher Autor für den Energieverbrauchswert der Lasergravur vorliegt.

Ein weiterer Baustein des Assistenzsystems ist die Verknüpfung des PCF mit dem Produktstruktur- und Geometriemodell. Dazu werden in der PCF Übersichtstabelle den pPCF Entitäten des STEP-Modells zugewiesen. Die Bezeichnung Entität im Kontext einer STEP-Datei weist einen anderen Sinn auf als die Bezeichnung im Kontext der Provenienz und sollte nicht verwechselt werden. Die Tabelle 6-2 zeigt die Verknüpfung zu den Produktentitäten und geometriebezogenen Entitäten in der STEP-Datei.

Tabelle 6-2: Verknüpfung der IDs des PCF mit den Hashs der Entitäten aus der STEP-Datei

PCF ID	**Name**	**Zugehörigkeit Entität**	**Hash der Entität in der STEP-Datei**
001	Rohmaterial	Körper Oberteil	#1393
002	Fräsen (Simulation)	Körper Oberteil	#1393
003	Härten	Oberfläche Oberteil	#1344
004	Lasergravur	Oberfläche Oberteil	#1344
005	Material (PLA)	Körper Unterteil	#1392
006	Energie	Körper Unterteil	#1392
007	ZKS M3x10	bg_Stiftehalter	#7639

Die Verknüpfung ist in der XML-Datei gespeichert und kann weiterverwendet werden. So lässt sich beispielsweise der PCF in einer CAD Software über den Import der STEP-Datei und der XML-Datei visualisieren. Ein Beispiel gibt Abbildung 6-14 in der CAD Software Siemens NX, in dem PMI zur Darstellung der PCF der Einzelteile genutzt werden, die sich aus den Summen der pPCF ergeben.

Letztlich kann das Assistenzsystem genutzt werden, um Stellschrauben zur Reduzierung des PCF ausfindig zu machen. Im vorliegenden Validierungsbeispiel des Stiftehalters ist der Einfluss des Rohmaterials des Oberteils signifikant. Eine Optimierungsmaßnahme könnte sein, dass das Rohmaterial passgenauer zum Produkt eingekauft wird. Als Beispiel wird hier eine Umrandung von 3 mm statt der zuvor genuteten Umrandung von 5 mm betrachtet. Durch diese Änderung ergibt sich ein pPCF des Rohmaterials von (1,244 ± 0,164) kg CO_2eq und somit eine Reduktion des Gesamt PCF von (4,105 ± 0,327) kg CO_2eq auf (3,491 ± 0,311) kg CO_2eq, was einer Einsparung von 15 % entspricht. Wird zudem der Wert mit Primärdaten einer Waage gemessen und nicht simuliert, steigt die AKZ von 74,76 auf 81,64.

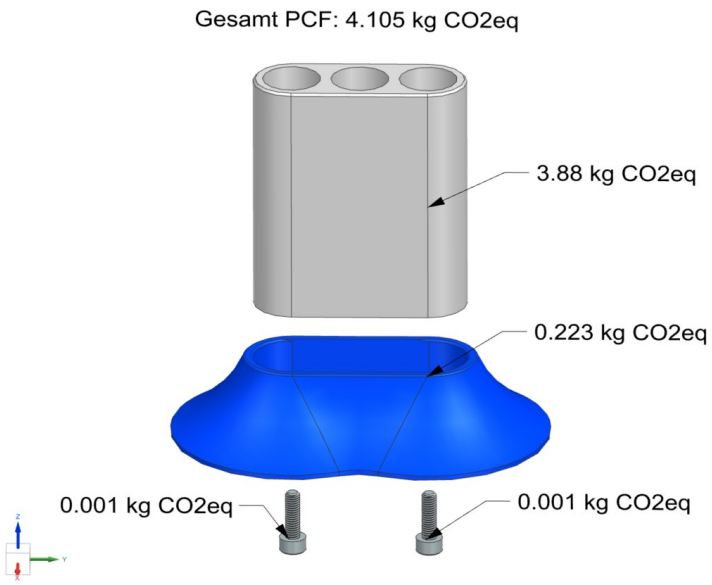


Abbildung 6-14: PMI zur Visualisierung des PCF in Siemens NX: Gesamt PCF und PCF der Einzelteile

6.3 Bewertung der Validierung

Anhand des Beispielprodukts Stiftehalter wird die Anwendung des Assistenzsystems CO_2mpass demonstriert, welches das Konzept zur Integration des CO_2-Fußabdrucks in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling prototypisch umsetzt. Die Nutzung des Assistenzsystems ermöglicht, dass der PCF von Baugruppen und Einzelteilen berechnet werden kann. Die Grundlage bilden pPCF, die beispielsweise von Fertigungsprozessen stammen. Die Verbrauchsdaten der Fertigungsprozesse lassen sich auf vier Arten integrieren: Primärdaten über eine direkte Verbindung zur Maschine, Sekundärdaten aus Simulationsdaten aufgrund von Geometriedaten und Fertigungsprogrammen, Abruf von Daten aus internen Ökodatenbanken sowie der Abruf aus externen Ökodatenbanken. Im Validierungsbeispiel sind die vier möglichen Datenquellen vertreten. Die Informationsqualität der einzelnen PCF wird variiert, um einen möglichst industrienahen Anwendungsfall zu generieren. In der Umsetzung der Validierung zeigt sich, dass die Datenlage für Unsicherheiten oftmals lückenhaft ist. Daher muss die Unsicherheit durch unterschiedliche Methoden berechnet oder durch Schätzwerte ergänzt werden. Werden Primärdaten verwendet, vereinfacht sich die Berechnung der Unsicherheit. Dafür müssen allerdings Datenblätter der Sensorik vorliegen.

Aus der Validierung der Qualität lässt sich ableiten, dass es möglich ist, Qualitätsindikatoren für den PCF im Assistenzsystem aufzustellen. Die Berechnung der Anteile an Primär-, Sekundärdaten aus Simulationsdaten, interner sowie externer Sekundärdaten wurde automatisiert berechnet und als Kreisdiagramm dargestellt. Die Bewertung der

Qualitätskriterien erfolgt durch die Eingabe des Benutzers unter Zuhilfenahme der Bewertungstabellen des Partialmodells PCF Qualität. Es werden für jeden pPCF Zahlenwerte von eins bis fünf angegeben. Die Vergabe der Zahlen obliegt jedoch dem subjektiven Eindruck des Benutzers. Die Unsicherheit geht automatisiert in die Berechnung der Qualitätsindikatoren mit ein. Weiterhin können die AKZ des Stiftehalters und dessen Einzelteile berechnet werden. Dies bildet die Grundlage, um Qualitätsverbesserungen durchzuführen. Als Beispiel wird die Erhöhung des Anteils an Primärdaten vom Assistenzprogramm vorgeschlagen.

Neben den Qualitätsindikatoren werden das PCF Sankeydiagramm und der PCF Provenienzgraph dargestellt. Für beide Darstellungen ist keine Benutzereingabe erforderlich, da sie aus der PCF Übersichtstabelle erstellt werden können. Ein Benutzer kann durch das Sankeydiagramm sehen, wo die Hauptverursacher des PCF liegen und dies als Grundlage für eine Optimierung nutzen. Der Provenienzgraph zeigt die Abhängigkeiten und dient ebenfalls zu Auswertungs- und Analysezwecken.

Die Informationen des PCF können als XML-Datei exportiert werden. Somit ist eine Grundlage zur Weiterverwendung gegeben. Die XML-Datei kann zusammen mit der STEP-Datei in ein CAD System geladen werden, sodass ein Konstrukteur den PCF des Bauteils am CAD Modell als Information nutzen kann.

6.4 Verifikation des Anforderungsprofils

Die Verifikation des Anforderungsprofils erfolgt in diesem Kapitel aufgrund der prototypischen Implementierung und der durchgeführten Validierung des Konzepts. Dazu werden die in Kapitel 3.4 definierten Anforderungen auf deren Erfüllungsgrad untersucht. Die Tabelle 6-3 am Ende dieses Kapitels gibt eine Übersicht über die Anforderungserfüllung durch die Einteilung in „vollständig erfüllt“, „teilweise erfüllt“ und „nicht erfüllt“.

Die allgemeinen Anforderungen an das Konzept bestehen aus sechs Festanforderungen und drei Wunschanforderungen. Alle Anforderungen konnten vollständig erfüllt werden. Die Anforderungen an das Informationsmodell teilen sich in vier Festanforderungen und zwei Wunschanforderungen. Hier konnten die vier Fest- und eine Wunschanforderung vollständig erfüllt werden. Die Wunschanforderung nach Maßnahmen zur Steigerung der Qualität ist teilweise erfüllt. Das liegt daran, dass die Maßnahmen im Konzept nicht vollständig abgedeckt und beschrieben sind. Die Qualität speist sich aus einer Vielzahl an Informationen und Quellen, aus denen sich ebenso viele Maßnahmen ableiten lassen. Zudem sind die Maßnahmen anwendungsspezifisch und können daher

nicht vollständig im Konzept abgebildet werden. Die sieben Fest- und zwei Wunschanforderungen der Implementierung konnten vollständig erfüllt werden. Die Wunschanforderung, die nur teilweise erfüllt werden konnte, beschreibt die Schnittstelle zu anderen Softwaresystemen. Im Anwendungssystem sind keine direkten Schnittstellen integriert. Es wurden Importfunktionen für das Produktstrukturmodell, das Geometriemodell und die Fertigungsprogrammierung sowie die Exportfunktion der Daten als XML-Datei integriert. Somit können die Daten in anderen Softwaresystemen weiterverwendet werden. Eine realisierte Schnittstelle ist die Verbindung zur Sensorik der Verbräuche von Maschinen über eine OPC UA Kommunikationsschnittstelle.

Tabelle 6-3: Übersicht der Anforderungserfüllung

● = Anforderung vollständig erfüllt
◐ = Anforderung teilweise erfüllt
○ = Anforderung nicht erfüllt
F = Festanforderung
W = Wunschanforderung

Nr.	Art	Erfüllungsgrad	Bezeichnung
Allgemeine Anforderungen an das Konzept			
1	F	●	Das Konzept muss in den Phasen der Produktentstehung anwendbar sein.
2	F	●	Das Konzept muss eine automatisierte Berechnung der Verbräuche durch einen Digitalen Master bzw. Digitalen Zwilling ermöglichen.
3	F	●	Das Konzept muss Informationen und Methoden zur Berechnung eines PCF enthalten.
4	W	●	Im Konzept soll eine Differenzierung zwischen Datenquellen und eine Priorisierung der Datenquellen intergiert sein.
5	F	●	Die Berechnung des PCF muss durch Dritte nachvollziehbar und reproduzierbar sein.
6	F	●	Das Konzept muss ein Vorgehen zur Berechnung der Unsicherheit des PCF enthalten.

Tabelle 6-3: Übersicht der Anforderungserfüllung

● = Anforderung vollständig erfüllt
◐ = Anforderung teilweise erfüllt
○ = Anforderung nicht erfüllt
F = Festanforderung
W = Wunschanforderung

Nr.	Art	Erfüllungsgrad	Bezeichnung
7	W	●	Die Aussagekraft eines PCF soll untersuchbar und beschreibbar sein.
8	W	●	Maßnahmen zur Steigerung der Aussagekraft eines PCF sollen ableitbar sein.
9	F	●	Der PCF muss mit dem Produktstruktur- und Geometriemodell verlinkt sein.
Anforderungen an das Informationsmodell			
10	F	●	Das Informationsmodell muss die benötigten Attribute des Konzepts in Klassen sowie Beziehungen der Klassen enthalten.
11	F	●	Das Informationsmodell muss über einen modularen Aufbau verfügen und Erweiterungen ermöglichen.
12	F	●	Das Informationsmodell muss Informationen für die Methoden zur Berechnung eines PCF bereitstellen und die Ergebnisse enthalten.
13	F	●	Das Informationsmodell muss Informationen zur Durchführung eines Qualitätsmanagements beinhalten.
14	W	●	Das Informationsmodell soll eine Analyse der Transparenz des PCF ermöglichen.
15	W	◐	Das Informationsmodell soll Maßnahmen zur Steigerung der Qualität des PCF enthalten.
Anforderungen an die Implementierung			
16	F	●	Das Anwendungssystem muss CAD-Dateien importieren können.

Tabelle 6-3: Übersicht der Anforderungserfüllung

● = Anforderung vollständig erfüllt ◐ = Anforderung teilweise erfüllt ○ = Anforderung nicht erfüllt F = Festanforderung W = Wunschanforderung			
Nr.	**Art**	**Erfüllungsgrad**	**Bezeichnung**
17	F	●	Das Anwendungssystem muss CAM-Programme importieren können.
18	F	●	Das Anwendungssystem muss Sensordaten importieren können.
19	F	●	Das Anwendungssystem muss Eingabedaten eines Nutzers verarbeiten können.
20	W	●	Die Programmiersprachen und Werkzeuge sollen plattformneutral sein.
21	F	●	Das Anwendungssystem muss einen PCF berechnen können.
22	F	●	Das Anwendungssystem muss eine Schnittstelle zu einer Ökodatenbank besitzen oder diese integrieren.
23	F	●	Das Anwendungssystem muss eine graphische Benutzungsoberfläche besitzen.
24	W	◐	Das Anwendungssystem soll eine Schnittstelle für andere Softwaresysteme besitzen.
25	W	●	Das Anwendungssystem soll eine graphische Darstellung der Zusammensetzung des PCF ermöglichen.

6.5 Fazit zur Validierung und Verifikation

In Kapitel Validierung und Verifikation wird die Anwendung des Konzepts durch das Assistenzsystem CO_2mpass anhand eines repräsentativen Beispielbauteils auf Praxistauglichkeit geprüft. Zunächst wird das Beispielbauteil Stiftehalter als Baugruppe aus vier

Einzelteilen vorgestellt. Es besteht aus einem gefrästen Aluminiumbauteil, dessen Fertigung simuliert wird, einem additiv gefertigten Kunststoffbauteil, über welches Primärdaten durch eine Anbindung einer FFF-Maschine direkt im Assistenzsystem verfügbar sind, und zwei Zylinderkopfschrauben als Zulieferteile. Es wird somit ein breites Anwendungsszenario geschaffen, in welchem sowohl Primärdaten, Sekundärdaten aus Simulationsdaten als auch Sekundärdaten als Quellen genutzt werden. In der Durchführung der Validierung wird durch die Bauteile des Assistenzsystems geführt. Als zentrale Datengrundlage dient die Eingabe der Informationen der pPCF der Einzelteile. Diese Informationen der pPCF werden anschließend genutzt, um den Gesamt PCF und die Unsicherheit nach FFP und MCS zu berechnen sowie die Qualitätsbewertung durchzuführen. Die Qualitätsbewertung ist unterteilt in die automatisierte Ableitung der Anteile an Primärdaten, Sekundärdaten aus Simulationsdaten, interne Sekundärdaten sowie externe Sekundärdaten und in die Ermittlung der Qualitätsindikatoren. Um diese zu berechnen, müssen zu jedem pPCF Bewertungen von eins bis fünf in sechs Kategorien vergeben werden. Neben den Qualitätsindikatoren wird die AKZ der Baugruppe und der Einzelteile abgeleitet. Im letzten Modul zur Provenienz lassen sich die Hauptverursacher des PCF über das PCF Sankeydiagramm sowie Informationslücken über den PCF Provenienzgraphen graphisch ermitteln. Die Graphen sind interaktiv durch den Benutzer veränderbar.

In der anschließenden Verifikation werden die Anforderungen aus Kapitel 3.4 genutzt, um eine Überprüfung auf Erfüllung durchzuführen. Es können alle Festforderungen erfüllt werden und die Wunschforderungen sind bis auf zwei Ausnahmen ebenfalls erfüllt.

Insgesamt zeigt das Kapitel, dass eine Umsetzung des Konzepts mit dem Assistenzsystem CO_2mpass Praxistauglichkeit besitzt und die zuvor aufgestellten Anforderungen mit zwei Ausnahmen erfüllt. Die Bedienung durch einen Benutzer ist intuitiv gestaltet und durch das Anwendungsbeispiel werden eine Vielzahl an Informationsquellen und unterschiedliche Verfügbarkeit von Informationen demonstriert. Die Möglichkeit, dass Assistenzsystem als Grundlage einer Optimierung zu nutzen, wird beispielhaft beschrieben. So kann der PCF um 15 % gesenkt werden, wenn das Volumen des Rohmaterials von 5 mm auf 3 mm Umrandung reduziert wird. Bei solch einer Maßnahme spielt die Verfügbarkeit der Zulieferung eine maßgebliche Rolle, die in dieser Dissertation nicht thematisiert wird. Zudem ist auf die AKZ zu achten, um die Ersparnis von 15 % auf Plausibilität zu prüfen. Sie kann beispielsweise erhöht werden, indem Primärdaten des Rohteils erhoben werden.

Zu Beginn des Konzepts in Kapitel 4 wurden vier Forschungsfragen aufgestellt, die im Konzept und in der prototypischen Implementierung beantwortet werden sollen. Die erste Frage nach der Quantifizierung des PCF inklusive Unsicherheit in den Phasen der

Produktentstehung wird durch die verschiedenen Möglichkeiten der Ermittlung des PCF in Form von Primärdaten und Sekundärdaten adressiert. Das Anwendungsbeispiel in der Validierung deckt die genannten Möglichkeiten ab. Primärdaten werden automatisiert durch eine Verknüpfung einer Maschine ermittelt. Es wird aufgezeigt, wie der PCF mit dem Produktstruktur- und Geometriemodell verlinkt werden kann, welches eine Antwort auf die zweite Forschungsfrage gibt. Darauffolgend wird ein Modell vorgestellt, wie die Unsicherheit des PCF ermittelt werden kann. Um die dritte Frage nach der Qualität des PCF zu beantworten, werden die Qualitäts- und Anteilsindikatoren vorgestellt, die in der AKZ zu einer einzigen Kennzahl zusammengeführt werden. Diese kann genutzt werden, um Maßnahmen abzuleiten, die zu einer Erhöhung der Aussagekraft führen. Die vierte Frage behandelt die Transparenz und Kommunikation des PCF und wie diese als Optimierungsgrundlage der PCF Berechnung genutzt werden können. Durch das PCF Sankeydiagramm und den PCF Provenienzgraph wird eine transparente Darstellungs- und Kommunikationsbasis für diesen Zweck erschaffen. Durch die Analyse der Graphen werden Schwachstellen der Berechnung einsehbar. Neben den Graphen sind die Ergebnisse und Informationen des PCF als XML-Datei zur weiteren Verarbeitung exportierbar. Die Verknüpfung der Informationen der XML-Datei mit der STEP-Datei werden anschließend in einer CAD-Software demonstriert.

Nachdem in diesem Kapitel die Praxistauglichkeit und Anwendbarkeit des Konzepts aufgezeigt wird, folgt ein Ausblick zu offenen Forschungsfragen, die sich im Rahmen dieser Dissertation ergeben haben. Abschließend wird eine Zusammenfassung gegeben.

7 Ausblick

Im Rahmen der Ausarbeitung dieser Dissertation haben sich offene Forschungsfragen ergeben, die in diesem Kapitel diskutiert werden. Die offenen Forschungsfragen dienen dazu, einen Ausblick auf zukünftige Arbeiten zu geben, bei denen diese Dissertation als Grundlage zu verstehen ist.

Zunächst wird für die Implementierung eine feste Anzahl an Iterationen der MCS festgelegt. Die Anzahl ist eine üblich genutzte Größe bei der Durchführung von Unsicherheitsberechnungen der Ökobilanz. Allerdings zeigt HEIJUNGS auf, dass die Iterationsanzahl je nach Datengrundlage variiert werden sollte, da eine zu hohe Anzahl das Ergebnis der Unsicherheit verfälscht [258]. Die Implementierung des Konzepts dieser Dissertation könnte um die Möglichkeit einer dynamischen Anzahl der Iterationen aufgrund der Arbeit von HEIJUNGS erweitert werden.

Im Partialmodell PCF Qualität liegt der Fokus auf der Quantifizierung der Datenqualitätsindikatoren der Verbrauchsdaten. Alle pPCF werden auf die Qualität der Verbrauchsdaten untersucht. Die Datenqualität – oder genauer – die Passgenauigkeit der Umrechnungsfaktoren bleibt bei der Berechnung der Indikatoren unberücksichtigt. Die Umrechnungsfaktoren entstammen in der Regel Sekundärdaten aus Ökodatenbanken und bilden den Anwendungsfall nicht detailgetreu nach. Die Berechnung der Qualitätsindikatoren könnte demnach um eine Bewertung der Passgenauigkeit der Umrechnungsfaktoren ergänzt werden.

Eine ähnliche Sichtweise kann auf die Berechnung der Unsicherheit angewendet werden. Die Unsicherheitswerte können aus Quellen stammen, die nicht direkt mit dem Ausgangswert korreliert sind oder Vereinfachungen unterliegen. Ein Beispiel hierfür ist die genutzte Unsicherheit aus dem Bericht zur Treibhausgasinventur zur Quantifizierung der CO_2-Äquivalente der Unsicherheit des Strommixes des Umweltbundesamts im Validierungsbeispiel [255, 256]. Die Passgenauigkeit und Datenqualität der Unsicherheiten könnten das Konzept zur Berechnung der Unsicherheit und der Datenqualität erweitern.

Das Konzept zur Berechnung des CO_2-Fußabdrucks in dieser Dissertation ist auf einen cradle-to-gate Ansatz beschränkt. Verbräuche aus der Nutzungsphase und die Behandlung des Bauteils nach Lebensende haben ebenfalls einen Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit. Das Konzept lässt sich auf eine Betrachtung des gesamtem Produktlebenszyklus erweitern, um eine holistische Sichtweise bis hin zur Kreislaufwirtschaft zu generieren. Weiterhin werden ausschließlich CO_2-Äquivalente als Kenngröße der Umweltauswirkungen betrachtet. Das Konzept könnte um weitere Kenngrößen wie beispielsweise den Wasserfußabdruck oder die Energieäquivalente erweitert werden. Es

bleibt zu klären, wie mehrere Kenngrößen benutzerfreundlich und übersichtlich integriert werden können.

Ein Bestandteil des Konzepts zur Integration des CO_2-Fußabdrucks in den Digitalen Master und Digitalen Zwilling ist die Verknüpfung der Informationen des CO_2-Fußabdrucks mit dem Produktstruktur- und Geometriemodell. Es wird exemplarisch gezeigt, wie sich pPCF auf die Körper- oder die Oberflächenentitäten beziehen lassen. Daraus lässt sich eine weitere Forschungsfrage ableiten, inwieweit sich Feature mit pPCF verknüpfen lassen. So könnten beispielsweise Bohrungen oder Fasen ein CO_2-Äquivalent zuweisen werden, um einen Konstrukteur mit weiteren Informationen bei seinen Entscheidungen zu unterstützen.

8 Zusammenfassung

Die Einführung von Strategien zur Steigerung der Nachhaltigkeit stellt produzierende Unternehmen vor große Herausforderungen. Die Voraussetzung zur Optimierung ist das Vorhandensein von verlässlichen Kennzahlen. Eine dieser Kennzahlen zum Nachhaltigkeitsmonitoring ist der CO_2-Fußabdruck, der sich für einzelne Produkt berechnen lässt und mit zunehmender Häufigkeit zu finden ist. Die Berechnung dieser Kennzahl ist allerdings an Rahmenbedingungen und Unsicherheiten geknüpft, da oftmals Sekundärdaten oder Schätzwerte in der Bilanzierung verwendet werden. Diese Unsicherheiten tauchen im alleinstehenden Endwert nicht auf und werden in der Nachhaltigkeitsbetrachtung vernachlässigt. Die Verwendung von Digitalen Zwillingen kann dazu beitragen, verlässliche Informationen zu Verbräuchen der Produktion automatisiert abzuleiten und bietet die Basis für eine Optimierung zur Steigerung der Nachhaltigkeit der Produkte.

Die vorliegende Dissertation präsentiert ein Konzept zur Berechnung des CO_2-Fußabdrucks von Produkten mit ergänzendem Qualitätsmanagement und integriert die Kennzahl in den Digitalen Master bzw. Digitalen Zwilling des Produkts. Das Konzept ermöglicht die Berechnung des CO_2-Fußabdrucks in den Phasen der Produktentstehung durch die Nutzung unterschiedlicher Datenquellen. Zur Entwicklung des Konzepts wird ein prozess- und aktivitätsorientierter Ansatz genutzt, aus dem sich ein Kernmodell und drei Partialmodelle ableiten. Das Ergebnis ist ein Informationsmodell mit definierten Klassen und dazugehörigen Attributen sowie Methoden, welches sich aus einem Kernmodell und drei Partialmodellen zusammensetzt.

Das Kernmodell beinhaltet das Berechnungskonzept des CO_2-Fußabdrucks als Summe der partiellen CO_2-Fußabdrücke von Einzelteilen, die sich wiederum aus CO_2-Fußabdrücken von Prozessen ergeben. Die Verbrauchswerte der Prozesse für das jeweilige Produkt können gemessen, simuliert, aus ähnlichen Prozessen abgeleitet oder geschätzt und mit einem Umrechnungsfaktor in CO_2-Äqulivalente umgewandelt werden. Die Umrechnungsfaktoren werden aus Ökodatenbanken bezogen, die im Konzept integriert sind und aus externen oder internen Quellen stammen. Ergänzend zur Berechnung des CO_2-Fußabdrucks wird eine Methodik vorgestellt, wie eine Unsicherheitsberechnung durchgeführt werden kann. Ausgangslage ist die Untersuchung der Daten und deren Quellen. Je nach Verfügbarkeit und Informationsgüte der Daten wird eine analytische Berechnung, eine probabilistische oder eine hybride Berechnung empfohlen.

Die produktspezifischen Verbrauchsdaten als Primärdaten lassen sich durch die Nutzung eines Digitalen Zwillings erheben, indem eine Verbindung zu den Produktionsmaschinen des Produkts aufgebaut wird und die Verbrauchsdaten automatisiert während der Pro-

duktion abgeleitet werden können. Falls eine Maschine nicht verfügbar ist oder das Produkt ausschließlich virtuell existiert, kann eine Simulation der Verbrauchsdaten durch digitale Analysetools des Geometriemodells oder durch eine Analyse der Fertigungsprogrammierung stattfinden, die im Digitalen Master des Produkts zu finden sind.

Durch die Nutzung unterschiedlicher Informationsquellen zur Berechnung des CO_2-Fußabdrucks ist eine Qualitätsbeschreibung nötig, die eine Quantifizierung der Güte ermöglicht. Die Beschreibung findet in Form von Datenanteilen und Qualitätsindikatoren statt. Es werden Qualitätsmatrizen je nach Art der Datenquelle vorgestellt, aus denen sich die Qualitätsindikatoren erheben lassen. Abschließend lässt sich aus den Datenanteilen und den Qualitätsindikatoren die in dieser Dissertation neu entwickelte Kennzahl der Aussagekraftzahl des CO_2-Fußabdrucks ermitteln, die eine Grundlage zur Qualitätsverbesserung bietet.

Begleitet wird der CO_2-Fußabdruck von einem Provenienzmodell, welches die Berechnung und deren Ursprung als Graph abbildet. Der erste Graph ist ein Sankeydiagramm, in dem die Anteile des CO_2-Fußabdrucks in dessen Bestandteile der Einzelteile und Prozesse aufgeteilt werden. Das Resultat ist ein Graph, bei dem die Hauptverursacher der Kennzahl direkt einsehbar sind und somit eine Optimierungsgrundlage bieten. Der zweite Graph ist ein Provenienzgraph, der die Aktivitäten und deren beteiligte Akteure sowie deren Vernetzung darstellt. Es werden Informationen zur Zusammensetzung der Berechnung, den Autoren und Informationslücken dargestellt.

Das Informationsmodell als Gesamtkonzept wird als Prototyp implementiert. Das Resultat ist ein softwaretechnisches Anwendungssystem, welches den Namen CO_2mpass trägt und als Assistenzsystem für einen Benutzer verstanden werden kann. Dort sind die Methoden des Konzepts umgesetzt und können somit auf Praxistauglichkeit geprüft werden. Diese Prüfung findet als Validierung mittels eines repräsentativen Anwendungsfalls statt. Es folgt die Verifikation des Anforderungsprofils. Dort wird das Konzept auf die aufgestellten Anforderungen zu Beginn dieser Dissertation untersucht.

Abschließend ergeben sich weitere Forschungsfragen, die sich während der Entwicklung des Konzepts ergeben haben. Diese werden beschrieben und dienen als Grundlage zur Weiterentwicklung des Konzepts und der zukünftigen Forschung auf dem Gebiet der Nachhaltigkeitsquantifizierung von Produkten. Bei der Nachhaltigkeitsbetrachtung von Produkten sollten weitere Kennzahlen neben dem CO_2-Fußabdruck berücksichtig werden. Weiterhin stellt die Passgenauigkeit der Umrechnungsfaktoren auf Äquivalente der jeweiligen Kennzahl eine Herausforderung dar.

In dieser Dissertation wird ein Informationsmodell für die Berechnung des CO_2-Fußabdrucks von Produkten mit ergänzendem Qualitätsmanagement entwickelt, welches in

den Digitalen Master bzw. Digitalen Zwilling integriert wird. Die Integration ermöglicht einen Nutzen des CO_2-Fußabdrucks als Grundlage einer Optimierung zur Steigerung der Nachhaltigkeit im Produktentstehungsprozess.

9 Literatur

[1] European Commission, *Amtsblatt der Europäischen Union L 282/1: Beschluss (EU) 2016/1841 des Rates über den Abschluss des im Rahmen des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen geschlossenen Übereinkommens von Paris im Namen der Europäischen Union*, 2016.

[2] Umweltbundesamt, *Strategy for long-term EU greenhouse gas emissions reductions*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2018.

[3] D. Günther, P. Gniffke und Y. Tarakji, *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2023: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2021*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2023.

[4] A. Bjørn, K. Richardson und M. Z. Hauschild, "A Framework for Development and Communication of Absolute Environmental Sustainability Assessment Methods", *Journal of Industrial Ecology*, Jg. 23, Nr. 4, S. 838–854, 2019, DOI: 10.1111/jiec.12820.

[5] DIN Deutsches Institut für Normungen e.V., *DIN EN ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2020.

[6] S. Leibrecht, *Information Model for the Integration of Ecological Assessments into Virtual Product Development*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. Aachen: Shaker, 2005.

[7] M. Roßmann, M. Stratmann, N. Rötzer, P. Schäfer und M. Schmidt, "Comparability of LCAs — Review and Discussion of the Application Purpose" in *Progress in Life Cycle Assessment 2019*, Cham, Schweiz: Springer, 2021, S. 213–225, DOI: 10.1007/978-3-030-50519-6_15.

[8] World Business Council for Sustainable Development, *PACT: partnership for carbon transparency: Pathfinder Framework: Guidance for the Accounting and Exchange of Product Life Cycle Emissions*, 2021.

[9] P. Mußler, S. Wolfgarten und A. Paulus, "Methodik und Aussagekraft von Klimabilanzen" in Bd. 11, *Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik: Praktikable Klimaschutz-Potenziale in der Abfallwirtschaft*, Prof. Dr.-Ing. Arnd I. Urban, Hg., Kassel, 2010.

[10] S. Hippmann, R. Klingner und M. Leis, "Digitalisierung – Anwendungsfelder und Forschungsziele" in *Digitalisierung*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2018, S. 9–18, DOI: 10.1007/978-3-662-55890-4_2.

[11] R. Zink, "Analyse der Publikationsaktivität zu Nachhaltigkeit und Digitalisierung: zwei getrennte oder doch ein Megatrend?" in *Bavarian Journal of Applied Sciences: 2022: Sonderheft - Nachhaltigkeit (ESG / CSR), Digitalisierung und Unternehmensführung 4.0*, Deggendorf, 2022, S. 54–65, DOI: 10.25929/BJAS202298.

[12] S. Winkler, J. Günther und R. Pfennig, "Nachhaltige Digitalisierung oder Nachhaltigkeit durch Digitalisierung?" (De;de), *HMD*, Jg. 60, Nr. 4, S. 815–836, 2023, DOI: 10.1365/s40702-023-00987-9.

[13] W. Leal Filho, *Digitalisierung und Nachhaltigkeit*. Berlin: Springer Spektrum, 2021.

[14] Deutscher Bundestag, *Abschlußbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt—Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“: Konzept Nachhaltigkeit Vom Leitbild zur Umsetzung*, 1998.

[15] R. Hansmann, H. A. Mieg und P. Frischknecht, "Principal sustainability components: empirical analysis of synergies between the three pillars of sustainability", *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, Jg. 19, Nr. 5, S. 451–459, 2012, DOI: 10.1080/13504509.2012.696220.

[16] A. Kröhling, "Digitalisierung – Technik für eine nachhaltige Gesellschaft?" in *CSR und Digitalisierung*, Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2021, S. 31–64, DOI: 10.1007/978-3-662-61836-3_3.

[17] M. Jacob, *Digitalisierung & Nachhaltigkeit: Eine unternehmerische Perspektive*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.

[18] H. Kagermann, W. Wahlster und J. Helbig, *Bericht der Promotorengruppe Kommunikation. Im Fokus: Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Handlungsempfehlungen zur Umsetzung, Forschungsunion*, 2012.

[19] H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig und Deutsche Post AG, *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises*

Industrie 4.0. acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., 2013.

[20] R. Anderl, "Industrie 4.0 – technological approaches, use cases, and implementation", *at - Automatisierungstechnik*, Jg. 63, Nr. 10, S. 753–765, 2015, DOI: 10.1515/auto-2015-0025.

[21] R. Anderl, S. Haag, K. Schützer und E. Zancul, "Digital twin technology – An approach for Industrie 4.0 vertical and horizontal lifecycle integration", *it - Information Technology*, Jg. 60, Nr. 3, S. 125–132, 2018, DOI: 10.1515/itit-2017-0038.

[22] J. Kletti und R. Deisenroth, "Anwendungskonzept – horizontale und vertikale Integration" in *MES-Kompendium*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2012, S. 13–29, DOI: 10.1007/978-3-642-32581-6_1.

[23] T. Kaufmann und L. Forstner, "Horizontale Integration der Wertschöpfungskette in der Halbleiterindustrie" in *Handbuch Industrie 4.0 Bd.1*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017, S. 95–103, DOI: 10.1007/978-3-662-45279-0_31.

[24] R. Isenmann und C. Rautenstrauch, "Horizontale und vertikale Integration Betrieblicher Umweltinformationssysteme (BUIS) in Betriebswirtschaftliche Anwendungsszenarien" (De;de), *uwf*, Jg. 15, Nr. 2, S. 75–81, 2007, DOI: 10.1007/s00550-007-0027-2.

[25] A. Mazak, M. Wimmer, C. Huemer, G. Kappel und W. Kastner, "Rahmenwerk zur modellbasierten horizontalen und vertikalen Integration von Standards für Industrie 4.0" in *Handbuch Industrie 4.0 Bd.2*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017, S. 433–454, DOI: 10.1007/978-3-662-53248-5_94.

[26] R. Anderl *et al., Leitfaden Industrie 4.0-Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand*. VDMA Forum Industrie 4.0, 2015.

[27] S. Heng, *Industrie 4.0: Upgrade des Industriestandorts Deutschland steht bevor*. Frankfurt am Main: Deutsche Bank Research, 2014.

[28] B. Kasper, *Industrie 4.0: Technologieentwicklung und sicherheitstechnische Bewertung von Anwendungsszenarien*. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).

[29] V. Roblek, M. Meško und A. Krapež, "A Complex View of Industry 4.0", *SAGE Open*, Jg. 6, Nr. 2, 215824401665398, 2016, DOI: 10.1177/2158244016653987.

[30] A. Massonet, R. Kiesel und R. H. Schmitt, "Der Digitale Zwilling über den Produktlebenszyklus", *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 115, Nr. 1, S. 97–100, 2020, DOI: 10.3139/104.112324.

[31] R. Stark, R. Anderl, K.-D. Thoben und S. Wartzack, "WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“", *ZWF*, Jg. 115, special, S. 47–50, 2020, DOI: 10.3139/104.112311.

[32] M. Grieves, "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication", 2015.

[33] S. Haag und R. Anderl, "Digital twin – Proof of concept", *Manufacturing Letters*, Jg. 15, S. 64–66, 2018, DOI: 10.1016/j.mfglet.2018.02.006.

[34] S. Haag, *Generierung topologieinvarianter Geometrierepräsentationen für Digitale Zwillinge*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. Düren: Shaker Verlag, 2019.

[35] M. Shafto, M. Conroy, R. Doyle, E. Glaessgen, C. Kemp und J. LeMoigne, *DRAFT Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap: Technology Area 11*. National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2010.

[36] E. H. Glaessgen und D. S. Stargel, "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles" in *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Honolulu, Hawaii, 2012, DOI: 10.2514/6.2012-1818.

[37] B. Piascik, J. Vickers, D. Lowry, S. Scotti, J. Stewart und A. Calomino, *Materials, structures, mechanical systems, and manufacturing roadmap: Technology Area 12*. National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2012.

[38] E. J. Tuegel, A. R. Ingraffea, T. G. Eason und S. M. Spottswood, "Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin", *International Journal of Aerospace Engineering*, Jg. 2011, S. 1–14, 2011, DOI: 10.1155/2011/154798.

[39] B. Gockel, A. Tudor, M. Brandyberry, R. Penmetsa und E. Tuegel, "Challenges with Structural Life Forecasting Using Realistic Mission Profiles" in *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Honolulu, Hawaii, 2012, DOI: 10.2514/6.2012-1813.

[40] E. Negri, L. Fumagalli und M. Macchi, "A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems", *Procedia Manufacturing*, Jg. 11, S. 939–948, 2017, DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.198.

[41] B. Bielefeldt, J. Hochhalter und D. Hartl, "Computationally Efficient Analysis of SMA Sensory Particles Embedded in Complex Aerostructures Using a Substructure Approach" in *ASME 2015*, Colorado Springs, Colorado, USA, 2015, DOI: 10.1115/SMASIS2015-8975.

[42] H.-K. Wang, R. Haynes, H.-Z. Huang, L. Dong und S. Atluri, "The Use of High-Performance Fatigue Mechanics and the Extended Kalman / Particle Filters, for Diagnostics and Prognostics of Aircraft Structures", *CMES*, Jg. 105, Nr. 1, S. 1–24, 2015, DOI: 10.3970/cmes.2015.105.001.

[43] Y. Bazilevs, X. Deng, A. Korobenko, F. Di Lanza Scalea, M. D. Todd und S. G. Taylor, "Isogeometric Fatigue Damage Prediction in Large-Scale Composite Structures Driven by Dynamic Sensor Data", *Journal of Applied Mechanics*, Jg. 82, Nr. 9, 2015, Art. no. 091008, DOI: 10.1115/1.4030795.

[44] M. Grieves und J. Vickers, "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems" in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Cham, Schweiz: Springer, 2017, S. 85–113, DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.

[45] E. Fourgeau, E. Gomez, H. Adli, C. Fernandes und M. Hagege, "System Engineering Workbench for Multi-views Systems Methodology with 3DEXPERIENCE Platform. The Aircraft RADAR Use Case" in *Complex Systems Design & Management Asia Advances in Intelligent Systems and Computing*, Singapur, 2016, S. 269–270, DOI: 10.1007/978-3-319-29643-2_21.

[46] R. Rosen, G. von Wichert, G. Lo und K. D. Bettenhausen, "About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing", *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 48, Nr. 3, S. 567–572, 2015, DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141.

[47] A. Canedo, "Industrial IoT lifecycle via digital twins" in *ESWEEK'16: TWELFTH EMBEDDED SYSTEM WEEK*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2016, DOI: 10.1145/2968456.2974007.

[48] M. Bajaj, B. Cole und D. Zwemer, "Architecture To Geometry - Integrating System Models With Mechanical Design" in *AIAA SPACE 2016*, Long Beach, Kalifornien, USA, 2016, DOI: 10.2514/6.2016-5470.

[49] J. Ríos, J. Hernandez-Matias, M. Oliva und F. Mas, "Product Avatar as Digital Counterpart of a Physical Individual Product: Literature Review and Implications in an Aircraft" in *Proceedings of the 22nd ISPE Inc. International Conference on Concurrent Engineering*, Delft, Niederlande, 2015, S. 657–666, DOI: 10.3233/978-1-61499-544-9-657.

[50] M. Schluse und J. Rossmann, "From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems" in *2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, Edinburgh, Schottland, 2016, S. 1–6, DOI: 10.1109/SysEng.2016.7753162.

[51] E. M. Kraft, "The Air Force Digital Thread/Digital Twin - Life Cycle Integration and Use of Computational and Experimental Knowledge" in *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, San Diego, Kalifornien, USA, 2016, DOI: 10.2514/6.2016-0897.

[52] J. Ríos, F. M. Morate, M. Oliva und J. C. Hernández, "Framework to support the aircraft digital counterpart concept with an industrial design view", *IJASM*, Jg. 9, Nr. 3, S. 212, 2016, Art. no. 79934, DOI: 10.1504/IJASM.2016.079934.

[53] E. B. Arisoy, G. Ren, E. Ulu, N. G. Ulu und S. Musuvathy, "A Data-Driven Approach to Predict Hand Positions for Two-Hand Grasps of Industrial Objects" in *ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Charlotte, North Carolina, USA, 2016, DOI: 10.1115/DETC2016-60095.

[54] G. Grinshpun, T. Cichon, D. Dipika und J. Rossmann, "From Virtual Testbeds to Real Lightweight Robots: Development and deployment of control algorithms for soft robots, with particular reference to" in *Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics*, München, 2016, S. 1–7.

[55] T. Gabor, L. Belzner, M. Kiermeier, M. T. Beck und A. Neitz, "A Simulation-Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems" in *2016 IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC)*, Würzburg, 7/17/2016 - 7/22/2016, S. 374–379, DOI: 10.1109/ICAC.2016.29.

[56] G. N. Schroeder, C. Steinmetz, C. E. Pereira und D. B. Espindola, "Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange", *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 49, Nr. 30, S. 12–17, 2016, DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.11.115.

[57] M. Abramovici, J. C. Göbel und H. B. Dang, "Semantic data management for the development and continuous reconfiguration of smart products and systems", *CIRP Annals*, Jg. 65, Nr. 1, S. 185–188, 2016, DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.051.

[58] B. Schleich, N. Anwer, L. Mathieu und S. Wartzack, "Shaping the digital twin for design and production engineering", *CIRP Annals*, Jg. 66, Nr. 1, S. 141–144, 2017, DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.040.

[59] B. Brenner und V. Hummel, "Digital Twin as Enabler for an Innovative Digital Shopfloor Management System in the ESB Logistics Learning Factory at Reutlingen - University", *Procedia Manufacturing*, Jg. 9, S. 198–205, 2017, DOI: 10.1016/j.promfg.2017.04.039.

[60] T. Mukherjee und T. DebRoy, "A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components", *Applied Materials Today*, Jg. 14, S. 59–65, 2019, DOI: 10.1016/j.apmt.2018.11.003.

[61] M. Javaid, A. Haleem und R. Suman, "Digital Twin applications toward Industry 4.0: A Review", *Cognitive Robotics*, Jg. 3, S. 71–92, 2023, DOI: 10.1016/j.cogr.2023.04.003.

[62] S. M. Jeon und S. Schuesslbauer, "Digital Twin Application for Production Optimization" in *2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapur, 2020, S. 542–545, DOI: 10.1109/IEEM45057.2020.9309874.

[63] V. Kutscher, J. Olbort, B. Röhm, C. Plesker und R. Anderl, "Web-based Digital Twin" in *Journal of Innovation: March 2021 Edition: Innovations in Digital Twins,* 16 Aufl. 2021, S. 1–18.

[64] G. Schroeder *et al.,* "Visualising the digital twin using web services and augmented reality" in *2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Poitiers, Frankreich, 7/19/2016 - 7/21/2016, S. 522–527, DOI: 10.1109/INDIN.2016.7819217.

[65] K. Ponomarev, N. Kudryashov und N. Popelnukha, "Main Principals and Issues of Digital Twin Development for Complex Technological Processes" in *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*, Wien, Österreich, 2017, S. 523–528, DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.074.

[66] K. Židek, J. Piteľ, M. Adámek, P. Lazorík und A. Hošovský, "Digital Twin of Experimental Smart Manufacturing Assembly System for Industry 4.0 Concept", *Sustainability*, Jg. 12, Nr. 9, S. 3658, 2020, DOI: 10.3390/su12093658.

[67] L. Liu, X. Zhang, X. Wan, S. Zhou und Z. Gao, "Digital twin-driven surface roughness prediction and process parameter adaptive optimization", *Advanced Engineering Informatics*, Jg. 51, S. 101470, 2022, DOI: 10.1016/j.aei.2021.101470.

[68] I. Osadcha, A. Jurelionis und P. Fokaides, "Geometric parameter updating in digital twin of built assets: A systematic literature review", *Journal of Building Engineering*, Jg. 73, S. 106704, 2023, DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106704.

[69] T. Orosz, K. Gadó, M. Katona und A. Rassõlkin, "Automatic Tolerance Analysis of Permanent Magnet Machines with Encapsuled FEM Models Using Digital-Twin-Distiller", *Processes*, Jg. 9, Nr. 11, S. 2077, 2021, DOI: 10.3390/pr9112077.

[70] X. Liu *et al.,* "Genetic Algorithm-Based Trajectory Optimization for Digital Twin Robots", *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, Jg. 9, S. 793782, 2021, DOI: 10.3389/fbioe.2021.793782.

[71] Y. H. Pan, N. Q. Wu, T. Qu, P. Z. Li, K. Zhang und H. F. Guo, "Digital-twin-driven production logistics synchronization system for vehicle routing problems with pick-up and delivery in industrial park", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Jg. 34, 7-8, S. 814–828, 2021, DOI: 10.1080/0951192X.2020.1829059.

[72] I. Errandonea, S. Beltrán und S. Arrizabalaga, "Digital Twin for maintenance: A literature review", *Computers in Industry*, Jg. 123, S. 103316, 2020, DOI: 10.1016/j.compind.2020.103316.

[73] S. Boschert und R. Rosen, "Digital Twin—The Simulation Aspect" in *Mechatronic Futures*, Cham, Schweiz: Springer, 2016, S. 59–74, DOI: 10.1007/978-3-319-32156-1_5.

[74] A. Madni, C. Madni und S. Lucero, "Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering", *Systems*, Jg. 7, Nr. 1, S. 7, 2019, DOI: 10.3390/systems7010007.

[75] C. Zhuang, T. Miao, J. Liu und H. Xiong, "The connotation of digital twin, and the construction and application method of shop-floor digital twin", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Jg. 68, S. 102075, 2021, DOI: 10.1016/j.rcim.2020.102075.

[76] L. Arnemann, S. Winter, N. Quernheim, P. Grieser, R. Anderl und B. Schleich, "Information Model to Return Data of Digital Twins into Product Design" in *Procedia CIRP: 30th CIRP Life Cycle Engineering Conference*, New Brunswick, New Jersey, USA, 2023, S. 173–178, DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.030.

[77] L. Arnemann, S. Winter, N. Quernheim und B. Schleich, "PRODUCT LIFE CYCLE MANAGEMENT WITH DIGITAL TWINS FOR PRODUCT GENERATION DEVELOPMENT" in *Proceedings of the Design Society: Volume 3 - ICED23*, Bordeaux, Frankreich, 2023, S. 2955–2964, DOI: 10.1017/pds.2023.296.

[78] C. Ma, H. Gui und J. Liu, "Self learning-empowered thermal error control method of precision machine tools based on digital twin", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Jg. 34, Nr. 2, S. 695–717, 2023, DOI: 10.1007/s10845-021-01821-z.

[79] X. Ma, J. Cheng, Q. Qi und F. Tao, "Artificial intelligence enhanced interaction in digital twin shop-floor" in *Procedia CIRP: 31st CIRP Design Conference 2021*, Online Konferenz, 2021, S. 858–863, DOI: 10.1016/j.procir.2021.05.031.

[80] F. Tao *et al.,* "Digital twin and blockchain enhanced smart manufacturing service collaboration and management", *Journal of Manufacturing Systems*, Jg. 62, S. 903–914, 2022, DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.11.008.

[81] C. Czwick, *Cyber Zwilling als Grundlage für Produkt-Service Systeme*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. Düren: Shaker, 2020.

[82] T. Bergs, C. Brecher, R. Schmitt und G. Schuh, *Internet of Production – Turning Data into Sustainability*. Aachen: Apprimus Verlag, 2021.

[83] S. S. Kamble, A. Gunasekaran, H. Parekh, V. Mani, A. Belhadi und R. Sharma, "Digital twin for sustainable manufacturing supply chains: Current trends, future perspectives, and an implementation framework", *Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 176, S. 121448, 2022, DOI: 10.1016/j.techfore.2021.121448.

[84] B. He und H. Mao, "Digital Twin-Driven Product Sustainable Design for Low Carbon Footprint", *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Jg. 23, Nr. 6, 2023, Art. no. 060805, DOI: 10.1115/1.4062427.

[85] J. Deuse, D. Wagstyl, V. Hernandez Moreno, M. Polikarpov, R. Wöstmann und F. Hoffmann, "Green Digital Twins in the Product Life Cycle" in *How can industrial management contribute to a brighter future?*, J. Deuse, Hg., GITO mbH Verlag, 2023, S. 167–186, DOI: 10.30844/wgab_2023_10.

[86] J. Michael *et al.,* "Towards the Concept of a Digital Green Twin for a Sustainable Product Lifecycle" in *Proceedings of the 1st International Conference on Water Energy Food and Sustainability (ICoWEFS 2021)*, Leiria, Portugal, 2021, S. 548–557, DOI: 10.1007/978-3-030-75315-3_59.

[87] G. Wang, Z. Bing, Z. Hou und Y. Li, "Energy Efficiency Optimization Based on Digital Twin Workshops", *AJETS*, Jg. 5, Nr. 13, S. 15–25, 2022, DOI: 10.25236/AJETS.2022.051303.

[88] V. Czako, *Skills for the clean energy transition*. Petten, Niederlande: European Commission, 2022.

[89] S. S. Kamble, A. Gunasekaran, H. Parekh, V. Mani, A. Belhadi und R. Sharma, "Digital twin for sustainable manufacturing supply chains: Current trends, future perspectives, and an implementation framework", *Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 176, S. 121448, 2022, DOI: 10.1016/j.techfore.2021.121448.

[90] A. Leiden, C. Herrmann und S. Thiede, "Cyber-physical production system approach for energy and resource efficient planning and operation of plating process chains", *Journal of Cleaner Production*, Jg. 280, S. 125160, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125160.

[91] E. Turan *et al.,* "Digital twin modelling for optimizing the material consumption: A case study on sustainability improvement of thermoforming process", *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, Jg. 35, S. 100655, 2022, DOI: 10.1016/j.suscom.2022.100655.

[92] S. Kaewunruen und Q. Lian, "Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems", *Journal of Cleaner Production*, Jg. 228, S. 1537–1551, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.156.

[93] L. Zhao, Y. Fang, P. Lou, J. Yan und A. Xiao, "Cutting Parameter Optimization for Reducing Carbon Emissions Using Digital Twin", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Jg. 22, Nr. 5, S. 933–949, 2021, DOI: 10.1007/s12541-021-00486-1.

[94] C. Chen, Z. Zhao, J. Xiao und R. Tiong, "A Conceptual Framework for Estimating Building Embodied Carbon Based on Digital Twin Technology and Life Cycle Assessment", *Sustainability*, Jg. 13, Nr. 24, S. 13875, 2021, DOI: 10.3390/su132413875.

[95] A. Barni, A. Fontana, S. Menato, M. Sorlini und L. Canetta, "Exploiting the Digital Twin in the Assessment and Optimization of Sustainability Performances" in *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)*, Funchal, Madeira, Portugal, 2018, S. 706–713, DOI: 10.1109/IS.2018.8710554.

[96] M. Rückert, S. Merkelbach, R. Alt und K. Schmitz, "Online Life Cycle Assessment for Fluid Power Manufacturing Systems – Challenges and Opportunities" in *IFIP advances in information and communication technology (Internet)*, Bd. 536, *Advances in production management systems: Smart manufacturing for Industry 4.0 : proceedings. Part II*, I. Moon, Hg., Springer, 2018, S. 128–135, DOI: 10.1007/978-3-319-99707-0_17.

[97] B. He, X. Cao und Y. Hua, "Data fusion-based sustainable digital twin system of intelligent detection robotics", *Journal of Cleaner Production*, Jg. 280, S. 124181, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124181.

[98] L. Li *et al.,* "Sustainability Assessment of Intelligent Manufacturing Supported by Digital Twin", *IEEE Access*, Jg. 8, S. 174988–175008, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026541.

[99] A. Seegrün *et al.,* "Sustainable product lifecycle management with Digital Twins: A systematic literature review" in *Procedia CIRP: 33rd CIRP Design Conference*, Sydney, Australien, 2023, S. 776–781, DOI: 10.1016/j.procir.2023.03.124.

[100] UN General Assembly, *Transforming our world : the 2030 Agenda for Sustainable Development*, 2015.

[101] H. Hassani, X. Huang und S. MacFeely, "Enabling Digital Twins to Support the UN SDGs", *BDCC*, Jg. 6, Nr. 4, S. 115, 2022, DOI: 10.3390/bdcc6040115.

[102] T. Wiedmann und J. Minx, "A Definition of 'Carbon Footprint'" in *Ecological economics research trends*, New York, USA: Nova Science, 2007.

[103] M. Hauschild und H. Wenzel, *Environmental Assessment of Products: Volume 2: Scientific background*. New York, USA: Springer, 1998.

[104] DIN Deutsches Institut für Normungen e.V., *DIN EN ISO 14067:2018: Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2018.

[105] M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum und S. I. Olsen, *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham, Schweiz: Springer, 2018.

[106] World Commission on Environment and Development, *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*. Oxford, England: Oxford University Press, 1987.

[107] DIN Deutsches Institut für Normungen e.V., *DIN EN ISO 14001:2015-11: Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015.

[108] W. Rees und M. Wackernagel, *Our ecological footprint: Reducing human impact on earth*. Philadelphia, Pennsylvania, USA: New Society Publishers, 1996.

[109] BSI British Standards Institution, *PAS 2050:2008: Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. London, England, 2008.

[110] PCF Pilotprojekt Deutschland, *Product Carbon Footprinting–Ein geeigneter Weg zu klimaverträglichen Produkten und deren Konsum?* Berlin, 2009.

[111] S. Wütz, *Der Product Carbon Footprint: Die Erfassung von Teibhausgasemissionen mittels CO2-Fußabdruck*. Hamburg: Diplomica Verlag GmbH, 2015.

[112] J. Schenten, *Product Carbon Footprint (PCF) und die Anreizsituation der Akteure in den Wertschöpfungsketten: Ergebnisse einer Befragung von Unternehmensverbänden*. Darmstadt, 2013.

[113] World Business Council for Sustainable Development und World Resources Institute, *The greenhouse gas protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*. Washington, D.C., USA: World Resources Institute, 2004.

[114] W. E. Rees, "Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out", *Environment and Urbanization*, Jg. 4, Nr. 2, S. 121–130, 1992, DOI: 10.1177/095624789200400212.

[115] G. P. Peters, "Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales", *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Jg. 2, Nr. 4, S. 245–250, 2010, DOI: 10.1016/j.cosust.2010.05.004.

[116] M. N. Postorino und L. Mantecchini, "A transport carbon footprint methodology to assess airport carbon emissions", *Journal of Air Transport Management*, Jg. 37, S. 76–86, 2014, DOI: 10.1016/j.jairtraman.2014.03.001.

[117] DIN Deutsches Institut für Normungen e.V., *DIN EN 15804:2022-03, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN_15804:2012+A2:2019_+ AC:2021*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2022.

[118] European Commission, *Amtsblatt der Europäischen Union L 124: für die Anwendung gemeinsamer Methoden zur EMPFEHLUNG DER KOMMISSION: Messung und Offenlegung der Umweltleistung von Produkten und Organisationen*. OPOCE, 2013.

[119] M. Finkbeiner, V. Bach und A. Lehmann, *Environmental Footprint: Der Umwelt-Fußabdruck von Produkten und Dienstleistungen: Abschlussbericht*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2018.

[120] S. Sala, A. Cerutti und R. Rant, *Development of a weighting approach for the Environmental Footprint*. Luxemburg, Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2018.

[121] L. Zampori und R. Rant, *Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method*. Luxemburg, Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2019.

[122] DIN Deutsches Institut für Normungen e.V., *DIN EN ISO 14027: 2018-04: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Entwicklung von Produktkategorieregeln*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2018.

[123] DIN Deutsches Institut für Normungen e.V., *DIN EN ISO 14026:2017: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Grundsätze, Anforderungen und Richtlinien für die Kommunikation von Fußabdruckinformationen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017.

[124] DIN Deutsches Institut für Normungen e.V., *DIN EN ISO 14025: 2011-10: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.

[125] DIN Deutsches Institut für Normungen e.V., *DIN EN ISO 14040:2006 + Amd:2020: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2020.

[126] W. Klöpffer und B. Grahl, *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf,* 2. Aufl. Weinheim: WILEY-VCH, 2012.

[127] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustanability, *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. Luxemburg, Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2010.

[128] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustanability, *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and action steps*. Luxemburg, Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2010.

[129] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustanability, *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Framework and requirements for life cycle impact assessment models and indicators*. Luxemburg, Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2010.

[130] C. J. L. Murray und A. D. Lopez, *The global burden of disease: A comprehensive assessment of mortality and disability from diseases, injuries, and risk factors in 1990 and projected to 2020*. Cambridge, Massachusetts, USA: Harvard University Press, 1996.

[131] P. Hofstetter, *Perspectives in life cycle impact assessment: A Structured Approach to Combine Models of the Technosphere, Ecosphere, and Valuesphere*. Boston: Kluwer Academic, 1998.

[132] H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara und K. Tanabe, Hg., *IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programm Inventories*. Hayama, Kanagawa, Japan: IGES, 2006.

[133] International Electronical Commission, *IEC TS 63058:2021: Switchgear and controlgear and their assemblies for low voltage – Environmental aspects*, 2021.

[134] DIN Deutsches Institut für Normungen e.V., *DIN EN IEC 63366:2023-01, Produktkategorieregeln für die Ökobilanzierung von elektrischen und elektronischen Produkten und Systemen (IEC_111/646/CD:2021); Text Deutsch und Englisch*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2023.

[135] M. Hassanzadeh, S. Theoleyre, R. Metz und C. Jollain, "Environmental Declaration in compliance with ISO 14025 thanks to a collaborative program of electrical and electronic industry: the PEP ecopassport program" in *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, Stockholm, Schweden, 2013, S. 138, DOI: 10.1049/cp.2013.0577.

[136] T. Görtz, A. Adisorn, Thomas und T. Lena, *Der Digitale Produktpass als Politik-Konzept: Kurzstudie im Rahmen der Umweltpolitischen Digitalagenda des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)*. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2021.

[137] C. Plociennik *et al.,* "Towards a Digital Lifecycle Passport for the Circular Economy" in *Procedia CIRP: 29th CIRP Life Cycle Engineering Conference*, Löwen, Belgien, 2022, S. 122–127, DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.021.

[138] Industrial Digital Twin Association, *IDTA 02023-0-9: Carbon Footprint: Submodel Template of the Asset Administration Shell*. Frankfurt am Main: Industrial Digital Twin Association, 2023.

[139] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., *VDMA Guideline: Berechnung des Product Carbon Footprint im Maschinen- und Anlagenbau*, 2022.

[140] Together for Sustainability, *The Product Carbon Footprint Guideline for the Chemical Industry: Specification for product Carbon Footprint and Corporate Scope 3.1 Emission Accounting and Reporting*, 2022.

[141] Catena-X Automotive Network e.V., *Catena-X Product Carbon Footprint Rulebook: CX-PCF Rules - Version 2*. Berlin, 2024.

[142] S. Winter, N. Quernheim, L. Arnemann, R. Anderl und B. Schleich, "FRAMEWORK FOR COMPARISON OF PRODUCT CARBON FOOTPRINTS OF DIFFERENT

MANUFACTURING SCENARIOS" in *Proceedings of the Design Society: Volume 3 - ICED23*, Bordeaux, Frankreich, 2023, S. 1935–1944, DOI: 10.1017/pds.2023.194.

[143] Carbon Trust, *Product carbon footprints: Requirements for assurance – Part 1: Technical Version 3*, 2023.

[144] J. Herrmann, *Qualitätsmanagement - Lehrbuch für Studium und Praxis*. München: Hanser, 2021.

[145] DIN Deutsches Institut für Normungen e.V., *DIN EN ISO 9000:2015 Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015.

[146] H. Brüggemann und P. Bremer, "Einführung und Überblick" in *Grundlagen Qualitätsmanagement*, H. Brüggemann und P. Bremer, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, S. 1–14, DOI: 10.1007/978-3-658-28780-1_1.

[147] J. M. Leimeister, *Einführung in die Wirtschaftsinformatik,* 12. Aufl. Berlin: Springer Gabler, 2015.

[148] M. Gebauer und U. Windheuser, "Strukturierte Datenanalyse, Profiling und Geschäftsregeln" in *Daten- und Informationsqualität*, K. Hildebrand, M. Gebauer, H. Hinrichs und M. Mielke, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 87–100, DOI: 10.1007/978-3-658-09214-6_5.

[149] D. M. Strong, Y. W. Lee und R. Y. Wang, "Data quality in context", *Communications of the ACM*, Jg. 40, Nr. 5, S. 103–110, 1997, DOI: 10.1145/253769.253804.

[150] J. P. Rohweder, G. Kasten, D. Malzahn, A. Piro und J. Schmid, "Informationsqualität — Definitionen, Dimensionen und Begriffe" in *Praxis, Daten- und Informationsqualität: Auf dem Weg zur Information excellence*, K. Hildebrand, Hg., 1 Aufl., Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008, S. 25–45, DOI: 10.1007/978-3-8348-9266-9_2.

[151] J. Kokemüller und F. Haupt, *Datenqualitätswerkzeuge 2012. Werkzeuge zur Bewertung und Erhöhung von Datenqualität*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

[152] D. J. Kennedy, D. C. Montgomery, D. A. Rollier und J. B. Keats, "Data Quality: Assessing Input Data Uncertainty in Life Cycle Assessment Inventory Models", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 2, Nr. 4, S. 229–239, 1997, DOI: 10.1007/BF02978420.

[153] P. F. Pelz, P. Groche, M. E. Pfetsch und M. Schaeffner, *Mastering uncertainty in mechanical engineering*. Cham, Schweiz: Springer, 2021.

[154] S. L. R. Ellison und A. Williams, *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement*. Eurachem/CITAC, 2012.

[155] I. Macdonald und P. Strachan, "Practical application of uncertainty analysis", *Energy and Buildings*, Jg. 33, Nr. 3, S. 219–227, 2001, DOI: 10.1016/S0378-7788(00)00085-2.

[156] P. R. Bevington, D. K. Robinson, J. M. Blair, A. J. Mallinckrodt und S. McKay, "Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences", *Computers in Physics*, Jg. 7, Nr. 4, S. 415, 1993, DOI: 10.1063/1.4823194.

[157] M. G. Morgan, M. Henrion und M. Small, *Uncertainity: A guide to dealing with uncertainity in quantitative risk and policy analysis*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1990.

[158] S. O. Funtowicz und J. R. Ravetz, *Uncertainty and Quality in Science for Policy*. Dordrecht, Niederlande: Springer, 1990.

[159] B. Priemer, "Richtig, präzise und genau" in *Unsicherheiten, aber sicher!: Vom kompetenten Umgang mit ungenauen Daten*, B. Priemer, Hg., 1 Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Springer, 2022, S. 19–44, DOI: 10.1007/978-3-662-63990-0_3.

[160] M. Grabe, *Grundriss der generalisierten Gauß'schen Fehlerrechnung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.

[161] DIN Deutsches Institut für Normungen e.V., *DIN 1319-3:1996-05, Grundlagen der Meßtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1996.

[162] DIN Deutsches Institut für Normungen e.V., *DIN 1319-1:1995-01, Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1995.

[163] M.-L. Hung und H. Ma, "Quantifying system uncertainty of life cycle assessment based on Monte Carlo simulation", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 14, Nr. 1, S. 19–27, 2009, DOI: 10.1007/s11367-008-0034-8.

[164] S. Sun und M. Ertz, "Life cycle assessment and Monte Carlo simulation to evaluate the environmental impact of promoting LNG vehicles", *MethodsX*, Jg. 7, S. 101046, 2020, DOI: 10.1016/j.mex.2020.101046.

[165] A. Ewertowska, C. Pozo, J. Gavaldà, L. Jiménez und G. Guillén-Gosálbez, "Combined use of life cycle assessment, data envelopment analysis and Monte Carlo simulation for quantifying environmental efficiencies under uncertainty", *Journal*

of Cleaner Production, Jg. 166, S. 771–783, 2017, DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.215.

[166] D. P. Kroese, T. Brereton, T. Taimre und Z. I. Botev, "Why the Monte Carlo method is so important today", *WIREs Computational Stats*, Jg. 6, Nr. 6, S. 386–392, 2014, DOI: 10.1002/wics.1314.

[167] J. Bewersdorff, *Statistik – wie und warum sie funktioniert: Ein mathematisches Lesebuch mit einer Einführung in R,* 2. Aufl. Berlin: Springer Spektrum, 2021.

[168] W. Gleißner und M. Wolfrum, *Risikoaggregation und Monte-Carlo-Simulation: Schlüsseltechnologie für Risikomanagement und Controlling*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.

[169] C. Hofstadler und M. Kummer, "Grundlagen der Monte-Carlo-Simulation" in *Chancen- und Risikomanagement in der Bauwirtschaft: Für Auftraggeber und Auftragnehmer in Projektmanagement, Baubetrieb und Bauwirtschaft*, C. Hofstadler und M. Kummer, Hg., Berlin: Springer Vieweg, 2017, S. 191–248, DOI: 10.1007/978-3-662-54319-1_6.

[170] C. E. Papadopoulos und H. Yeung, "Uncertainty estimation and Monte Carlo simulation method", *Flow Measurement and Instrumentation*, Jg. 12, Nr. 4, S. 291–298, 2001, DOI: 10.1016/S0955-5986(01)00015-2.

[171] H. K. McMillan, I. K. Westerberg und T. Krueger, "Hydrological data uncertainty and its implications", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, Jg. 5, Nr. 6, e1319, 2018, DOI: 10.1002/wat2.1319.

[172] G. Finnveden *et al.,* "Recent developments in Life Cycle Assessment", *Journal of Environmental Management*, Jg. 91, Nr. 1, S. 1–21, 2009, DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.

[173] R. Heijungs, "Selecting the best product alternative in a sea of uncertainty", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 26, Nr. 3, S. 616–632, 2021, DOI: 10.1007/s11367-020-01851-4.

[174] R. Heijungs und Mark A. J. Huijbregts, "A Review of Approaches to Treat Uncertainty in LCA" in *2nd International Congress on Environmental Modelling and Software*, Osnabrück, 2004.

[175] P. Hofstetter, *Perspectives in life cycle impact assessment: a structured approach to combine models of the technosphere, ecosphere and valuesphere*. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1998.

[176] S. M. Lloyd und R. Ries, "Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in Life-Cycle Assessment: A Survey of Quantitative Approaches", *Journal of Industrial Ecology*, Jg. 11, Nr. 1, S. 161–179, 2007, DOI: 10.1162/jiec.2007.1136.

[177] J. Perkins und S. Suh, "Uncertainty Implications of Hybrid Approach in LCA: Precision versus Accuracy", *Environmental science & technology*, Jg. 53, Nr. 7, S. 3681–3688, 2019, DOI: 10.1021/acs.est.9b00084.

[178] E. Igos, E. Benetto, R. Meyer, P. Baustert und B. Othoniel, "How to treat uncertainties in life cycle assessment studies?", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 24, Nr. 4, S. 794–807, 2019, DOI: 10.1007/s11367-018-1477-1.

[179] B. Kuczenski, "False confidence: are we ignoring significant sources of uncertainty?", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 24, Nr. 10, S. 1760–1764, 2019, DOI: 10.1007/s11367-019-01623-9.

[180] A. Weyand, P. Bausch, B. Engel, J. Metternich und M. Weigold, "Analysis of Uncertainty Factors in Part-Specific Greenhouse Gas Accounting", *Sustainability*, Jg. 15, Nr. 24, S. 16871, 2023, DOI: 10.3390/su152416871.

[181] T. Pfeifer und W. Masing, *Masing Handbuch Qualitätsmanagement,* 7. Aufl. München: Hanser, 2021.

[182] G. E. Weidner, *Qualitätsmanagement: Kompaktes Wissen, konkrete Umsetzung, praktische Arbeitshilfen,* 2. Aufl. München: Hanser, 2017.

[183] DIN Deutsches Institut für Normungen e.V., *DIN EN 60812:2006-11, Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA) (IEC_60812:2006); Deutsche Fassung EN_60812:2006*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2006.

[184] W. Jakoby, *Qualitätsmanagement für Ingenieure: Ein praxisnahes Lehrbuch für die Planung und Steuerung von Qualitätsprozessen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.

[185] A. von Ahsen, L. Petruschke und N. Frick, "Sustainability Failure Mode and Effects Analysis – A systematic literature review", *Journal of Cleaner Production*, Jg. 363, S. 132413, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132413.

[186] M. Lindahl, "E-FMEA-a new promising tool for efficient design for environment" in *Proceedings First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Tokio, Japan, 20--, S. 734–739, DOI: 10.1109/ECODIM.1999.747707.

[187] E. Abele, R. Anderl, H. Birkhofer und B. Rüttinger, Hg., *EcoDesign: Von der Theorie in die Praxis*. Berlin, New York, USA: Springer, 2008.

[188] A. Kemper, "Datenbanksysteme in Business, Technologie und Web (BTW 2007)" in *12. Fachtagung des GI-Fachbereichs "Datenbanken und Informationssysteme"(DBIS)*, Aachen, 2007.

[189] S. Reitenbach, M. Vieweg, C. Hollmann und R.-G. Becker, "Usage of Data Provenance Models in Collaborative Multi-Disciplinary Aero-Engine Design" in *ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, Online Konferenz, 2020, DOI: 10.1115/GT2020-14139.

[190] T. Giese, *Design Data Literacy - Herkunftsmanagement, Nachverfolgung und Souveränität digitaler Entwicklungsdaten*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. Düren: Shaker Verlag, 2023.

[191] P. Groth, S. Miles, V. Tan und L. Moreau, "Architecture for Provenance Systems: Version 0.4", 2005.

[192] P. Buneman und S. B. Davidson, *Data provenance–the foundation of data quality*, 2010.

[193] Y. Cui, J. Widom und J. L. Wiener, "Tracing the lineage of view data in a warehousing environment", *ACM Transactions on Database Systems*, Jg. 25, Nr. 2, S. 179–227, 2000, DOI: 10.1145/357775.357777.

[194] J. Zhao, C. Goble, M. Greenwood, C. Wroe und R. Stevens, *Annotating, linking and browsing provenance logs for e-Science*, 2003.

[195] L. Moreau, J. Freire, J. Futrelle, R. E. McGrath, J. Myers und P. Paulson, "The Open Provenance Model: An Overview" in *Lecture Notes in Computer Science, Provenance and Annotation of Data and Processes*, J. Freire, D. Koop und L. Moreau, Hg., Berlin, Heidelberg: SPRINGER NATURE, 2008, S. 323–326, DOI: 10.1007/978-3-540-89965-5_31.

[196] Yolanda Gil *et al., PROV Model Primer: W3C Working Group Note*, 2013.

[197] L. Moreau *et al.,* "The Open Provenance Model core specification (v1.1)", *Future Generation Computer Systems*, Jg. 27, Nr. 6, S. 743–756, 2011, DOI: 10.1016/j.future.2010.07.005.

[198] K. Behajjame *et al., PROV-O: The PROV Ontology*. World Wide Web Consortium, 2013.

[199] K. Belhajjame *et al., PROV-DM: The PROV Data Model*. World Wide Web Consortium, 2013.

[200] J. Cheney, S. Soiland-Reyes, L. Moreau und P. Missier, *PROV-N: The Provenance Notation*. World Wide Web Consortium, 2013.

[201] T. De Nies, J. Cheney, P. Missier und L. Moreau, *Constraints of the PROV Data Model*. World Wide Web Consortium, 2013.

[202] H. Hua, C. Tilmes, S. Zednik und L. Moreau, *PROV-XML: The PROV XML Schema*. World Wide Web Consortium, 2013.

[203] L. Moreau, P. Groth, J. Cheney, T. Lebo und S. Miles, "The rationale of PROV", *Journal of Web Semantics*, Jg. 35, S. 235–257, 2015, DOI: 10.1016/j.websem.2015.04.001.

[204] L. Moreau und P. Groth, *Provenance : An Introduction to PROV*. Cham, Schweiz: Springer, 2013.

[205] E. R. Hansen, M. Lissandrini, A. Ghose, S. Løkke, C. Thomsen und K. Hose, "Transparent Integration and Sharing of Life Cycle Sustainability Data with Provenance" in *International Semantic Web Conference*, Athen, Griechenland, 2020, S. 378–394, DOI: 10.1007/978-3-030-62466-8_24.

[206] A. Ghose, K. Hose, M. Lissandrini und B. P. Weidema, "An Open Source Dataset and Ontology for Product Footprinting" in *European Semantic Web Conference*, Online Konferenz, 2019, S. 75–79, DOI: 10.1007/978-3-030-32327-1_15.

[207] R. Anderl und D. Trippner, *STEP STandard for the Exchange of Product Model Data: Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normanreihe ISO 10303*. Leipzig: B. G. Teubner Stuttgart, 2000.

[208] International Organization for Standardization, *ISO 10303-1:2021-03: Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 1: Overview and fundamental principles*, 2021.

[209] International Organization for Standardization, *ISO 10303-11: 2004-11-00: Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 11: Description methods: The EXPRESS language reference manual*, 2004.

[210] J. Fowler, *STEP for Data Management, Exchange and Sharing*. Twickenham, Middlesex: Technology Appraisals, 1996.

[211] S. J. Kemmerer, *STEP, The Grand Experience*. Gaithersburg, Maryland, USA: National Institute of Standards and Technology, 1999.

[212] *STEP Application Handbook: ISO 10303 Version 3*. North Charleston, South Carolina, USA: SCRA, 2006.

[213] O. Anokhin, *Modellbasierte Auswertung von Messdaten zur Prüfung der Bauteilgestalt*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. Düren: Shaker, 2022.

[214] International Organization for Standardization, *ISO 10303-21:2016-03-00: Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Produktdatendarstellung und -austausch - Teil 21: Implementierungsmethoden: Klartext-Kodierung der Austauschstruktur*, 2016.

[215] International Organization for Standardization, *ISO 10303-28:2007-10-00: Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Produktdatendarstellung und -austausch - Teil 28: Implementierungsmethoden: XML Darstellungen von EXPRESS Schemata und Daten unter Verwendung von XML Schemata*, 2007.

[216] International Organization for Standardization, *ISO 10303-22:1998-12-00: Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 22: Implementation methods: Standard data access interface*, 1998.

[217] International Organization for Standardization, *ISO 10303-45:2019-11-00: Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Produktdatendarstellung und -austausch - Teil 45: Allgemeine integrierte Ressourcen: Material- und andere technische Eigenschaften*, 2019.

[218] International Organization for Standardization, *ISO 10303-46:2022-12-00: Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 46: Integrated generic resource: Visual presentation*, 2022.

[219] International Organization for Standardization, *ISO 10303-101:2022-12-00: Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 101: Integrated application resource: Draughting*, 2022.

[220] International Organization for Standardization, *ISO 10303-104:2000-12-00: Industrielle Automatisierungssysteme und -integration - Produktdatendarstellung und -austausch - Teil 104: Anwendungsbezogene integrierte Ressourcen: Finite-Element- Analyse*, 2000.

[221] International Organization for Standardization, *ISO 10303-242:2020-04-00: Industrial automation systems and integration - Product data representation and*

exchange - Part 242: Application protocol: Managed model-based 3D engineering, 2020.

[222] R. Lipman und J. Lubell, "Conformance checking of PMI representation in CAD model STEP data exchange files", *Computer-Aided Design*, Jg. 66, S. 14–23, 2015, DOI: 10.1016/j.cad.2015.04.002.

[223] International Organization for Standardization, *ISO 10303-42:2022-12-00: Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 42: Integrated generic resource: Geometric and topological representation*, 2022.

[224] G. Hammond, "Time to give due weight to the 'carbon footprint' issue", *Nature*, Jg. 445, Nr. 7125, S. 256, 2007, DOI: 10.1038/445256b.

[225] A. de Koning, D. Schowanek, J. Dewaele, A. Weisbrod und J. Guinée, "Uncertainties in a carbon footprint model for detergents; quantifying the confidence in a comparative result", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 15, Nr. 1, 2010, DOI: 10.1007/s11367-009-0123-3.

[226] S. Winter, N. Quernheim, L. Arnemann, R. Anderl und B. Schleich, "Approach to Reduce the Environmental Impact of a CNC Manufactured Product in the CAD Phase" in *MANUFACTURING DRIVING CIRCULAR ECONOMY: Proceedings of the 18th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, Berlin, 2023, S. 749–756, DOI: 10.1007/978-3-031-28839-5_84.

[227] N. Quernheim, S. Winter, L. Arnemann und B. Schleich, "METHOD FOR THE INTEGRATION OF COMPUTER AIDED MANUFACTURING DATA IN LIFE CYCLE ASSESSMENT" in *Proceedings of the Design Society: Volume 3 - ICED23*, Bordeaux, Frankreich, 2023, S. 2635–2644, DOI: 10.1017/pds.2023.264.

[228] C. Kecher, R. Hoffmann-Elbern und T. Will, *UML 2.5: Das umfassende Handbuch,* 7. Aufl. Bonn: Rheinwerk Computing, 2021.

[229] B. Bender und K. Gericke, *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung,* 9. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2021.

[230] C. Hettich, B. Jödicke und J. Sum, "Energie" in *Physik Methoden: Vielseitig anwendbare Konzepte, Techniken und Lösungsstrategien für Ingenieurwesen und Wirtschaft*, C. Hettich, B. Jödicke und J. Sum, Hg., 1 Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer, 2023, S. 243–270, DOI: 10.1007/978-3-662-67906-7_11.

[231] J. Seemann und J. W. von Gudenberg, *Software-Entwurf mit UML 2: Objektorientierte Modellierung mit Beispielen in Java,* 2. Aufl. Berlin: Springer, 2006.

[232] International Organization for Standardization, *ISO/IEC 19505-1:2012-04-00: Information technology - Object Management Group Unified Modeling Language (OMG UML) - Part 1: Infrastructure*, 2012.

[233] C. Rupp, S. Queins und die SOPHISTen, *UML 2 glasklar: Praxiswissen für die UML-Modellierung,* 4. Aufl. München: Hanser, 2012.

[234] H. J. van Randen und Bercker, *Einführung in UML*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.

[235] E. Abele, R. Anderl und H. Birkhofer, *ENVIRONMENTALLY- friendly product development: Methods and tools*. London, England: Springer, 2005.

[236] R. L. Ashenhurst, "Ontological aspects of information modeling", *Minds and Machines*, Jg. 6, Nr. 3, S. 287–394, 1996, DOI: 10.1007/BF00729802.

[237] K. Eden und H. Gebhard, *Dokumentation in der Mess- und Prüftechnik: Messen - Auswerten - Darstellen Protokolle - Berichte - Präsentationen,* 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.

[238] C. Frey, J. Penman, L. Hanle, S. Monni und S. Ogle, "Volume 1 General Guidance and Reporting: Chapter 3: Uncertaintiesby the National Greenhouse Gas Inventories Programm Inventories" in *IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programm Inventories*, H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara und K. Tanabe, Hg., Hayama, Kanagawa, Japan: IGES, 2006.

[239] S. L. Baggott *et al., UK Greenhouse Gas Inventory, 1990 to 2003: Annual report for submission under the Framework Convention on Climate Change*, 2005.

[240] M. Drosg, *Dealing with Uncertainties: A Guide to Error Analysis,* 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.

[241] N. Paciornik, M. Gillenwater, R. De Lauretis, D. Romano, S. Monni und S. M. Ogle, "Volume 1 General Guidance and Reporting: Chapter 3: Uncertainties" in *IPCC 2019, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, E. Calvo Buendia et al., Hg., Schweiz: The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019.

[242] R. Heijungs und M. Lenzen, "Error propagation methods for LCA—a comparison", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 19, Nr. 7, S. 1445–1461, 2014, DOI: 10.1007/s11367-014-0751-0.

[243] M. Fick, *Modellbasierter Entwurf virtueller Sensoren zur Regelung von PKW-Dieselmotoren*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2012.

[244] T. Bauernhansel, J. Krüger, G. Reinhart und G. Schuh, *WGP-Standpunkt Industrie 4.0*. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V., 2016.

[245] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes und W. Sihn, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification", *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 51, Nr. 11, S. 1016–1022, 2018, DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

[246] P. Bausch, A. Weyand, M. Weigold und J. Metternich, "Design Model For Traceability-Supported Assessment Of Product Carbon Footprint" in *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2023 - 1*, Santiago de Querétaro, Mexiko, 2023, DOI: 10.15488/13430.

[247] B. Heinrich, P. Linke und M. Glöckler, *Grundlagen Automatisierung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.

[248] C. Bergmann und W. Sobek, *Prozesse entwerfen: Eine Strategie für die Zukunft des Bauens*. Basel, Schweiz: Birkhäuser, 2019.

[249] B. P. Weidema, "Multi-user test of the data quality matrix for product life cycle inventory data", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 3, Nr. 5, S. 259–265, 1998, DOI: 10.1007/BF02979832.

[250] B. P. Weidema, C. Bauer und R. Hischier, *Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3: Ecoinvent Report 1(v3)*. St. Gallen, Schweiz: The ecoinvent Centre, 2013.

[251] M. Schmidt, "Der Einsatz von Sankey-Diagrammen im Stoffstrommanagement", *Beiträge der Hochschule Pforzheim*, Jg. 124, 2021.

[252] H. Schnitzer, *Grundlagen der Stoff- und Energiebilanzierung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.

[253] C. Mutel, "Brightway: An open source framework for Life Cycle Assessment", *JOSS*, Jg. 2, Nr. 12, S. 236, 2017, DOI: 10.21105/joss.00236.

[254] D. E. Burmaster und P. D. Anderson, "Principles of good practice for the use of Monte Carlo techniques in human health and ecological risk assessments", *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*, Jg. 14, Nr. 4, S. 477–481, 1994, DOI: 10.1111/j.1539-6924.1994.tb00265.x.

[255] P. Icha und T. Lauf, *Entwicklung der spezifischen Treibhausgas- Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2022*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2023.

[256] D. Günther und P. Gniffke, *Nationaler Inventarbericht Zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2020: gekürzte Version zur EU-Submission*. Umweltbundesamt, 2022.

[257] S. Winter, J. O. Osterod und B. Schleich, "Enabling Product Carbon Footprint Management in the Material Extrusion Process" in *Procedia CIRP: 31st CIRP Life Cycle Engineering Conference*, Turin, Italien, 2024, S. 31–36, DOI: 10.1016/j.procir.2024.01.006.

[258] R. Heijungs, "On the number of Monte Carlo runs in comparative probabilistic LCA", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 25, Nr. 2, S. 394–402, 2020, DOI: 10.1007/s11367-019-01698-4.